UNIVERSITÉ DE DIJON

FACULTÉ DES SCIENCES DE LA VIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

LABORATOIRE DE BOTANIQUE APPLIQUÉE

THESE

présentée à la FACULTÉ DES SCIENCES DE LA VIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

en vue d'obtenir le titre de DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Fevzi Mustafa ECEVIT

Ingénieur Agronome de la Faculté d'Agronomie de l'Université d'Ankara

---

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA NUTRITION MINÉRALE DE LA VIGNE CULTIVÉE SUR SOLUTIONS CONTROLÉES

Soutenue le 30 Mai 1975, devant la Commission d'Examen

M.	P. HENRY	*Président*
M.	R. BESSIS	*Rapporteur*
Mme	S. MERIAUX	*Examinateurs*
M.	J. BERGERET	*Examinateurs*

- 1975 -

UNIVERSITÉ DE DIJON

FACULTÉ DES SCIENCES DE LA VIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

LABORATOIRE DE BOTANIQUE APPLIQUÉE

THESE

présentée à la FACULTÉ DES SCIENCES DE LA VIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

en vue d'obtenir le titre de DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Fevzi Mustafa ECEVIT

Ingénieur Agronome de la Faculté d'Agronomie de l'Université d'Ankara

---

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA NUTRITION MINÉRALE DE LA VIGNE CULTIVÉE SUR SOLUTIONS CONTROLÉES

Soutenue le 30 Mai 1975, devant la Commission d'Examen

M.	P. HENRY	*Président*
M.	R. BESSIS	*Rapporteur*
Mme	S. MERIAUX	*Examinateurs*
M.	J. BERGERET	*Examinateurs*

- 1975 -

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

A ma mère et ma femme

Ce travail est l'aboutissement des recherches effectuées au Laboratoire de Botanique Appliquée de la Faculté des Sciences de la Vie et de l'Environnement de Dijon.

Qu'il nous soit permis d'exprimer toute notre gratitude à Monsieur le Professeur Pierre HENRY qui nous a accueilli dans son laboratoire.

Nous sommes profondément reconnaissant à Monsieur le Professeur Roger BESSIS de nous avoir confié le sujet de ce travail qu'il a suivi tout au long de son élaboration ainsi que pour les conseils éclairés qu'il nous a donnés et le temps précieux qu'il nous a consacré.

Nous adressons nos vifs remerciements à Madame Suzanne MERIAUX, Directeur de Recherches à l'INRA qui nous a permis de bénéficier de sa grande compétence en matière de nutrition minérale des végétaux et qui a bien voulu accepter de juger ce travail.

Monsieur Jacques BERGERET, Directeur du Centre d'études viticoles et oenologiques de l'Université de Dijon a toujours manifesté un vif intérêt pour le développement de ces recherches, il a bien voulu faire partie du jury de ce travail ; nous l'en remercions très sincèrement.

Nous avons d'autre part été accueilli avec bienveillance dans différents laboratoires pour y effectuer des stages : nous tenons à remercier très vivement Mademoiselle GROSMAN, Chef de laboratoire d'analyse à l' INRA de Dijon, Monsieur LEVY, Directeur de Laboratoire Coopératif du Diagnostic Foliaire et de Biochimie Agricole qui nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine du diagnostic foliaire ainsi que Monsieur Blas TARODO de la FUENTE, Maître-Assistant à l'Université de Nancy qui nous a initié aux techniques de l'absorption atomique.

Nous remercions également Monsieur Pierre HARTMANN, Directeur de l'IUT de Dijon qui nous a accepté dans les locaux de son établissement et permis d'utiliser certaines de ses installations.

Nous tenons à adresser nos remerciements à l'ensemble du personnel de l'IBANA et de l'IUT de Dijon pour l'accueil qu'il nous a réservé.

SOMMAIRE

	Page
RESUME	1
OBJET DU PRESENT TRAVAIL	2
PREMIERE PARTIE	
ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	3
I - LES APPORTS DE L'ANALYSE VEGETALE	4
1 - Rappel de quelques données essentielles concernant les éléments principaux et l'évolution de la teneur foliaire en fonction de différents caractères	6
2 - Les interactions	12
II - CULTURES EN SOLUTIONS CONTROLEES	15
III - DEFINITION DE QUELQUES SOLUTIONS NUTRITIVES	17
1 - Solutions proposées pour des cas particuliers de la pratique horticole	17
2 - Solutionspermettant de fixer de manière très précise la composition en éléments minéraux	22
3 - Solutions minérales particulièrement adaptées à la vigne	24
DEUXIEME PARTIE	
NUTRITION MINERALE DE LA VIGNE EN CULTURE HYDROPONIQUE	
MATERIEL ET METHODES	27
A - MATERIEL VEGETAL	27
B - METHODES	28
I - DESCRIPTION DE L'INSTALLATION DE CULTURE HYDROPONIQUE	28
II - SOLUTIONS NUTRITIVES	29
III - CONDITIONS CLIMATIQUES DES CHAMBRES DE CULTURE	32
IV - METHODES D'ANALYSE	32

V - PRESENTATION DES CARACTERES BIOLOGIQUES OBSERVES ET MESURES 33

RESULTATS 36

A - EVOLUTION DE LA COMPOSITION MINERALE DE SOLUTIONS NUTRITIVES 36

I - EVOLUTION DE LA CONCENTRATION GLOBALE DES SOLUTIONS NUTRITIVES ET CONSOMMATION D'EAU PAR LES PLANTES 36

II - EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN ELEMENTS MINERAUX DES SOLUTIONS NUTRITIVES EN FONCTION DU TEMPS 38

CONCLUSION 42

B - INTERPRETATION DES OBSERVATIONS CONCERNANT L'EVOLUTION DU PH DES SOLUTIONS NUTRITIVES EN COURS D'UTILISATION 43

I - EVOLUTION DU PH EN L'ABSENCE DE LA PLANTE 43

II - EVOLUTION DU PH EN PRESENCE DE LA PLANTE 44

CONCLUSION 46

C - INFLUENCE DES SOLUTIONS NUTRITIVES SUR LA CROISSANCE ET LE DEVELOPPEMENT DE LA VIGNE 47

I - ANALYSE DES CARACTERES DE LA CROISSANCE VEGETATIVE ET INFLORESCENTIELLE 47

1 - Croissance végétative 47

2 - Croissance inflorescentielle et florale 49

II - QUANTITE DE MATIERE SECHE SYNTHETISEE ET CARACTERES DE L'AOUTEMENT 49

CONCLUSION 53

D - DISCUSSION DE QUELQUES CARACTERES ASSOCIES AUX RELATIONS ENTRE LA CROISSANCE ET LA SOLUTION NUTRITIVE 55

I - ESSAI DE DESCRIPTION ET D'INTERPRETATION DES SYMPTOMES VISIBLES DE CARENCE ET DE TOXICITE 55

II - ESSAI D'EVALUATION DU COEFFICIENT DE TRANSPIRATION 57
CONCLUSION 59
E - EFFET DES SOLUTIONS NUTRITIVES SUR LA COMPOSITION MINERALE DE LA VIGNE 60
I - RESULTATS ANALYTIQUES ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS HABITUELLES 60
1 - Composition minérale de la feuille 60
a) Effet de la solution 1 - azote 60
b) Effet de la solution 2 - soufre 62
c) Effet de la solution 3 - phosphore 62
d) Effet de la solution 4 - potassium 63
e) Effet de la solution 5 - calcium 64
f) Effet de la solution 6 - magnésium 65
g) Effet de la solution 7 - HUGLIN 66
h) Effet de la solution 8 : HOMES 66
i) Effet de la solution 9 - BECQUET 67
Conclusion 68
2 - Composition minérale des rameaux 68
a) Rameaux verts 70
b) Rameaux aoûtés 70
3 - Composition minérale des racines 71
Conclusion 71
II - ETUDE ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS POUR LA FEUILLE SUR LES DIFFERENTES SOLUTIONS 72
1 - Aspect global 72
2 - Relation pour chaque élément entre sa teneur dans la plante et dans la solution nutritive en fonction des caractères de la solution nutritive dont il provient 73
a) Azote 74
b) Soufre 74
c) Phosphore 75
d) Potassium 75

e) Calcium 75
f) Magnésium 76
Conclusion 76
III - ETUDE DES RAPPORTS ENTRE CERTAINS ELEMENTS MINERAUX 77
1 - Rapport N/P 77
2 - Rapport K/P 77
3 - Rapport K/Mg 78
4 - Rapport Ca/Mg 78
CONCLUSION 78
F - BILAN D'UTILISATION DES ELEMENTS MINERAUX PAR LA VIGNE CULTIVEE EN HYDROPONIQUE 79
CONCLUSION 81

TROISIEME PARTIE
NUTRITION MINERALE DE LA VIGNE EN CULTURE STERILE 84

MATERIEL ET METHODES 84

RESULTATS 86
A - ETUDE DES CARACTERES DE LA CROISSANCE 86
B - ETUDE DE L'UTILISATION DES ELEMENTS MINERAUX ET DE L'EAU 89
I - ANALYSE CHIMIQUE DU VEGETAL ENTIER 89
II - BILAN D'UTILISATION DES ELEMENTS MINERAUX 93
III - EAU : COEFFICIENT DE TRANSPIRATION 95
CONCLUSION 98

CONCLUSION GENERALE ET PROPOSITION D'UNE SOLUTION NUTRITIVE 100
PROPOSITION D'UNE SOLUTION NUTRITIVE 101

ANNEXE
- PRODUITS CHIMIQUES UTILISES POUR LA REALISATION DES SOLUTIONS NUTRITIVES 105

- MESURE DU COEFFICIENT DE TRANSPIRATION DE LA VIGNE CULTIVEE IN VITRO 110

BIBLIOGRAPHIE 111

RESUME

Le présent travail qui a pour but essentiel une meilleure connaissance de la nutrition minérale de la vigne a été réalisé en utilisant des techniques de cultures hydroponiques et de cultures stériles. Il a permis d'étudier l'évolution relative de composition chimique (éléments principaux) de 9 solutions en rapport avec les caractères de la croissance obtenue.

Grâce à l'étude de l'évolution des solutions nutritives au cours de la culture il a été possible de connaître les transformation de ces solutions dans le domaine des rapports entre éléments nutritifs et de la concentration totale de la solution. L'origine de cette évolution, provenant d'une part de l'absorption par le végétal et d'autre part de précipitations, a été étudiée en détail

Les différences de croissance des plantes obtenues sur les 9 solutions nutritives ont été mesurées. Toutes les solutions ont permis des croissances que l'on peut considérer comme actives mais des variations symptomatiques dans la quantité de matière sèche ou dans les caractères de l'aoûtement ont pu être constatées.

L'analyse chimique de tous les tissus synthétisés (feuilles, rameaux verts, rameaux aoûtés, racines) a été réalisée pour toutes les solutions nutritives ; des comparaisons intéressantes ont été effectuées, malgré une certaine hétérogénéité des résultats dont l'origine a pu être cernée.

En conclusion il est apparu que l'utilisation des éléments minéraux par la plante se fait en faible quantité par rapport à la quantité fournie dans la solution. Il en ressort que l'eau de la solution nutritive est utilisée de manière beaucoup plus intense que les éléments minéraux. En tenant compte de tous les résultats obtenus dans ce travail et en particulier de la composition chimique de la vigne et de son cœfficient de transpiration il a été possible de proposer sur des bases objectives une solution nutritive qui semble adaptée à cette plante.

OBJET DU PRESENT TRAVAIL

Nous nous proposons par des études de laboratoire en conditions contrôlées (enceinte climatique) de contribuer à la connaissance de la nutrition minérale de la vigne. En effet dans les conditions naturelles, l'étude de la nutrition minérale de cette plante est dépendante de deux groupes de facteurs qui rendent difficile l'interprétation des résultats. Les deux facteurs que nous cherchons à contrôler ici sont :

1) Le sol avec ses caractères biologiques, évolutifs donc difficiles à maitriser et ses caractères physicochimiques dont l'analyse et surtout l'interprétation sont soumises à discussion.

2) La plante, végétal pérenne, avec une souche importante et des racines très développées lui permettant d'opposer un pouvoir toujours très efficace et de longue durée aux variations de l'alimentation minérale.

Afin d'éliminer ces deux groupes de difficultés nous utiliserons les méthodes de culture hydroponique et de culture stérile ; dans ces deux cas le milieu nutritif sur lequel se développe la plante est parfaitement connu et le matériel vivant de départ consiste en un fragment de végétal aussi petit que possible. La culture ne durant que quelques mois, nous espérons éviter l'écueil du pouvoir tampon/toujours très développé de la souche et nous rapprocher quant à l'efficacité de nos traitements des résultats obtenus par d'autres auteurs sur des plantes herbacées.

Accessoirement, ceci étant une idée de départ vite abandonnée, nous espérions pouvoir mener jusqu'à la récolte les grappes contenues dans les bourgeons que nous mettions en culture.

PREMIERE PARTIE

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

L'homme s'intéresse depuis l'antiquité à la production de matière végétale. Cependant, c'est au 19^{e} siècle que les travaux dans le domaine de la nutrition minérale commencent à se développer de manière importante.

En 1832, de CANDOLLE (in HOMES, 1969) attire l'attention sur le fait que des substances, dont l'origine est minérale, jouent un rôle essentiel dans la vie du végétal.

Vers 1860, l'agronome allemand KNOP réalise des cultures en milieu liquide avec une formule de solution nutritive (KNOP, 1868) qui est toujours en usage, pendant qu'au même moment un physiologiste, SACHS, réussit au laboratoire, pour les besoins de la recherche, des expériences de cultures en milieu liquide (SACHS, 1868).

Après un demi-siècle, en Californie, GERICKE développe la pratique de la culture en milieu liquide et donne à sa technique un nom désormais universel : "Soilless Culture". Cette méthode a subi de nombreux développements et plusieurs variantes en ont été proposées ; il s'agit par exemple de variations de support (sable, gravier, brique pilée, billes de verre, tourbe, etc...), ou du mode d'apport de la solution nutritive (percolation, subirrigation, niveau constant, liquide perdu, liquide récupéré, etc...). Des noms divers recouvrant tous à peu près le même type de réalisation ont été proposés : aquiculture, culture hydroponique, culture sans sol, culture sur eau...).

Plus récemment, de très importants travaux ont été conduits par de nombreux chercheurs, soit dans le cadre de la recherche scientifique en vue de préciser certains caractères physiologiques fondamentaux, soit dans le cadre plus technique de l'amélioration des méthodes de production végétale.

I - LES APPORTS DE L'ANALYSE VEGETALE

Les recherches concernant l'analyse des végétaux connaissent un regain d'intérêt quand LAGATU et MAUME (1926) introduisent la notion de diagnostic foliaire en vue de déterminer les besoins en éléments minéraux de la vigne et de la pomme de terre. Cette méthode de travail connait alors un succès certain. Dans le monde entier, elle est utilisée, avec de légères variantes, pour le contrôle de l'alimentation minérale des espèces végétales les plus variées. Le but poursuivi est de déterminer la composition minérale des plantes fournissant les rendements les plus élevés et de comparer cette composition à celle des plantes à rendement faible, ce qui permettrait d'adapter la fumure de manière précise.

L'originalité essentielle de la méthode réside, d'après les auteurs, dans l'observation continue d'un organe en croissance, le plus souvent une feuille, dont la place sur la plante est déterminée, plutôt qu'en l'analyse de la plante entière ou d'un ensemble d'organes. L'analyse de la feuille ainsi choisie, tout au long de son existence, fournit un aperçu de la dynamique de l'alimentation minérale de la plante entière au cours de la même période.

En fait, le diagnostic foliaire qui est une mise en pratique des idées exposées ci-dessus, consiste chez la vigne à analyser des feuilles déterminées à quatre stades phénologiques définis (LAGATU et MAUME, 1934) : avant la floraison, pendant la floraison, à la nouaison et à la maturité.

Mais LEVY (1968) avec ses collaborateurs, pour des raisons de rentabilité et de commodité pratiques et économiques, a pu diminuer le nombre de ces échantillonnages à deux tout en conservant une bonne physionomie de l'alimentation de la vigne : l'un de ces prélèvements a lieu à la nouaison, l'autre à la véraison.

Ces échantillonnages consistent à prendre les feuilles situées en face des grappes inférieures et y doser N, P, K et Mg, éléments pour lesquels la pratique a montré que les carences étaient les plus fréquentes.

L'interprétation des résultats est toujours délicate parce que les normes de référence correspondant à une croissance optimum ne sont connues qu'avec une marge d'approximation assez large (voir plus loin le cas de la

teneur en K). D'autre part, quand on analyse une seule feuille et que l'on constate, par exemple, une baisse de la teneur en un élément, il est difficile de savoir si cette variation correspond à une dilution de l'élément par la croissance ou une redistribution à l'intérieur de la plante. De la même manière, une augmentation de la teneur en un élément ne signifie pas forcément que la quantité totale de cet élément a augmenté à l'intérieur de la plante (ALEXANDER et WOODHAM, 1971 - GOUNY, 1956).

La méthode du diagnostic foliaire a été transposée à d'autres parties du végétal tels le bois, le limbe et le pétiole (BERGMAN and Coll., 1958 - JAMES et Coll., 1963 - CARLES et Coll., 1964 - DELAS et MOLOT, 1965 - LOUE, 1965 - BOUAT, 1968 - CHRISTENSEN, 1968 - VIDAL et Coll., 1971), au suc (ROUTCHENKO, 1965) et d'autres organes ou parties d'organes (DELMAS et Coll., 1959 - BRUZAU et Coll., 1968 - SAGLIO, 1969).

Dans certains cas, il semble que le diagnostic pétiolaire présente des avantages par rapport au diagnostic foliaire ; la sensibilité de ces deux parties de végétal aux variations d'alimentation minérale dépend surtout de l'époque de l'échantillonnage. A titre d'exemple, nous nous proposons de donner les résultats des travaux de Madame MERIAUX et de ses collaborateurs (1972) réalisés dans le vignoble de l'Université de Dijon.

Sensibilité des deux séries d'organes (MERIAUX, 1972. Rapport non publié) :

Début floraison	P > L pour Ca, K P < L pour Mg
Fin floraison	P > L pour N, Ca, K P < L pour Mg
Véraison	P > L pour N, K P < L pour Mg
Maturité	P < L pour Mg

D'autre part, si l'on compare les teneurs en éléments minéraux des feuilles et des pétioles, on arrive, dans la plupart des cas, aux conclusions suivantes (MERIAUX et Coll., 1972 - BERGMAN et Coll., 1958 - COOK et LIDER, 1964 - CARLES et Coll., 1964 - COOK et KISHABA, 1965):

- Les teneurs en azote et en phosphore des pétioles sont toujours inférieures à celles des limbes.
- Les teneurs en potassium et en magnésium des pétioles sont supérieures à celles des limbes.
- Les teneurs en calcium des pétioles sont inférieures à celles des limbes, à partir de la véraison.

Il apparaît donc que, pour l'étude de certains problèmes définis, une partie de végétal puisse fournir la meilleure image d'un phénomène de carence ou de toxicité, ce qui s'explique par le fait que certains éléments migrent ou s'accumulent de manière particulière dans certains organes. Mais, dans la majorité des cas, l'analyse foliaire est considérée comme la meilleure référence.

Quelle que soit la méthode de diagnostic choisie, pour pouvoir juger les résultats des analyses, la connaissance du rôle et du niveau quantitatif des éléments minéraux entrant dans le métabolisme du végétal s'impose. Nous nous proposons d'en indiquer les grandes lignes en considérant principalement le cas de la vigne.

1 - RAPPEL DE QUELQUES DONNEES ESSENTIELLES CONCERNANT LES ELEMENTS PRINCIPAUX ET L'EVOLUTION DE LA TENEUR FOLIAIRE EN FONCTION DE DIFFERENTS CARACTERES.

Azote -(N)

Constituant principal des protéines et des acides nucléiques, il est indispensable à tous les systèmes vivants.

L'absorption de l'azote se fait sous forme de NO_3^- et NH_4^+.

Son insuffisance dans le milieu de culture se marque chez la vigne par les caractères suivants : diminution de la croissance, pâlissement des feuilles et chute précoce des feuilles de la base ce qui indique une grande mobilité de l'élément (autophagie), diminution de la teneur en azote des feuilles et de divers organes.

Son excès serait, selon certains, aussi nuisible que son insuffi-

sance bien que des expériences récentes réalisées dans le cadre du "groupe d'étude de la Pourriture grise"(*) montrent qu'il ne suffit pas d'avoir un excès d'azote dans le sol pour retrouver cet excès dans la plante. On admet généralement que l'excès d'azote se marque par une activité végétative très intense, un allongement du cycle végétatif et des modifications dans l'équilibre des appareils végétatif et reproducteur. Les feuilles sont vert foncé, grandes, épaisses avec un parenchyme palissadique très développé.

LAGATU et MAUME (1934), puis MAUME et DULAC (1948) ont déterminé les niveaux critiques de la teneur en azote en dessous desquels il y aurait des signes de déficience en azote :

N : 3,2% de la matière sèche de la feuille au début de la floraison
N : 2,5% de la matière sèche de la feuille à la floraison
N : 1,75% de la matière sèche de la feuille à la maturation

Il apparaît donc que la teneur optimum en azote varie en fonction de l'âge de la plante et qu'elle est d'autant plus basse que le cycle végétatif est plus avancé.

La plupart des travaux montrent que la teneur en azote du pétiole est toujours inférieure à celle du limbe (SHAULIS et KIMBAL, 1956 - SAMISH et Coll., 1961 - GENTILLINI et CAPPELLERI, 1959 - CARLES et Coll., 1964 - COOK et KISHABA, 1956). La majorité des analyses fait apparaître une teneur en azote total de l'ordre de 1,5% à 2% dans la feuille. Cette teneur est généralement plus faible dans les pétioles, surtout à certaines époques de l'année ; certains travaux (COOK et KISHABA, 1956) indiquent une teneur moyenne pétiolaire de l'ordre de 0,20% à 0,30% de la matière sèche ; les valeurs étant nettement plus basses que celles obtenues par la plupart des auteurs, sont difficiles à interpréter. Dans la pratique agronomique, l'azote est considéré comme un élément très mobile et très facilement absorbable quand on l'apporte dans le sol, il semble que ce soit le cas général avec les plantes herbacées. Cependant dans le cas de la vigne des apports d'une grande quantité d'azote (300 Kg de N/hectare) ont pu rester presque sans effet sur la teneur en azote des tissus foliaires et des fruits (MERIAUX et Coll., 1972).

(*) Groupe de recherche appliquée mis en place à l'instigation de l'Institut Technique du Vin.

Soufre - (S)

L'absorption du soufre par la plante se fait sous forme d'ion SO_4^{--}.

Le problème de la fertilisation en soufre dans les vignobles ne s'étant pas posé jusqu'alors du fait de l'utilisation généralisée de soufre et de sulfate de cuivre, les observations de carence sont donc pratiquement inexistantes. Cependant le soufre joue un rôle important dans le métabolisme. Il entre dans la composition de diverses protéines et de quelques hétérosides. La cystine, la cystéine et la méthionine sont des acides aminés soufrés. Le glutathion (transporteur d'hydrogène), la coenzyme A sont des composés soufrés (BOUARD-POUGET, in RIBERAU-GAYON et coll., 1971)

Donc, l'insuffisance du soufre dans le milieu nutritif provoquera certains troubles physiologiques.

Phosphore -(P)

Il intervient dans la constitution des nucléoprotéides et des lipides complexes. Il se combine avec les sucres et donne des oses phosphatés. Il est nécessaire à l'activité de nombreuses enzymes et il entre dans la constitution de nombreux composés biologiquement très importants (LINSER, 1958 - DELMAS, 1971).

Son absorption par la plante se fait sous forme d'ions $H_2PO_4^-$, HPO_4^{--}, PO_4^{---}.

Son insuffisance peut dans certains cas se marquer au niveau des feuilles par une coloration vert foncé et un rougissement des nervures qui est le signe de l'accumulation d'anthocyanes dans les feuilles âgées. Puis apparaît une décoloration des feuilles et une déformation du limbe. On note une réduction de la croissance et de la fructification avec un retard de la véraison (DELMAS, 1971).

Il n'y a peut-être pas de symptôme de l'excès de phosphore mais on peut atteindre dans certains cas une consommation de luxe.

La teneur moyenne annuelle en phosphore des feuilles se situe aux environs de 0,22% de la matière sèche ; au dessous de cette teneur, il appa-

raitrait une insuffisance de l'alimentation en phosphore (LAGATU et MAUME, 1934 - MAUME et DULAC, 1948 - LEVY, 1964 - FREGONI, 1970 - DELMAS, 1971). Pourtant on constate que la teneur en phosphore diminue à mesure que la feuille vieillit (MAUME, 1951 - LEVY, 1964 - CARLES et Coll., 1964).

En général, les teneurs moyennes des pétioles en cet élément varient de 0,10% à 0,56% ; celles des limbes de 0,15% à 0,70% de la matière sèche , selon le cépage et l'époque de l'échantillonnage (BEATTIE et FORSHEY, 1954 - COOK et KISHABA, 1956 - SMITH et Coll., 1957 - BERGMAN et Coll., 1958 - CARLES et Coll., 1964). Ces teneurs sont pour la feuille en moyenne de 0,25% au début de la floraison et 0,12% à la maturation (LAGATU et MAUME, 1934).

Potassium - (K)

Elément très mobile, présent à l'état de K^+ dans le cytoplasme et les vacuoles (LINSER, 1958 - RIBEREAU-GAYON , 1971). Il intervient dans la régulation osmotique et par conséquent, dans la teneur en eau des végétaux (LINSER, 1958). Il est en même temps pris par la salification des acides organiques.

L'absorption du potassium se fait sous forme d'ions K^+.

Son insuffisance est visible sur les feuilles âgées : les marges des feuilles jaunissent ou rougissent. Le pourtour du limbe sur les jeunes feuilles se nécrose. Sur les feuilles âgées, les symptômes sont principalement internervaires (DELMAS, 1971 - BRANAS, 1962). Le reste du limbe est vert franc. La dimension de la plante est réduite. Elle présente un aspect maladif et brûlé (BRANAS, 1962). L'aoûtement des sarments est précoce, la fructification réduite et la véraison retardée (DELMAS, 1971 - GÄRTEL, 1965) : cette carence qui est la cause du rougeau ou de la brunissure (BRANAS, 1962) n'est pas toujours très facile à distinguer de l'insuffisance magnésienne vers la fin de la saison de végétation.

Les effets de l'excès du potassium sont, dans une certaine mesure, opposés à ceux de l'azote (BRANAS, 1971). Il accélère la synthèse de l'acide tartrique et augmente l'accumulation de réserves (hexoses, amidon).

Le poids du sarment diminue, alors que le rendement en raisin et la teneur en sucre augmentent. En outre, il a un effet inhibiteur sur la mise à fleur (DANAILOV et MICHAILOVA, 1971).

La teneur normale des feuilles en potassium varie selon MAUME et DULAC (1948) de 1,6% à 2,5% de la matière sèche selon l'époque de l'échantillonnage. Pourtant LEVY (1970) trouve ce niveau un peu trop élevé et propose les chiffres de 1,50% à 1,75% de la matière sèche. En outre, MAUME (1951) note que selon l'époque de prélèvement, la teneur en potassium peut varier de 0,8% à 8% de la matière sèche. Quoiqu'il en soit, la concentration en potassium est normalement en décroissance avec l'âge de la feuille (MAUME, 1951 - CARLES et Coll., 1964 - DIETRICH et Coll., 1964).

Les résultats de l'analyse des pétioles, des limbes et des feuilles entières obtenus par plusieurs auteurs nous permettent de donner les teneurs moyennes en potassium de ces trois types d'échantillons (MAUME et DULAC, 1948 - LARSEN et Coll., 1956 - SHAULIS et KIMBALL, 1956 - GENTILLINI et CAPELLERI, 1959 - COOK et CARLSON, 1961 - CARLES et Coll., 1964):

Pour le limbe : 0,44% à 1,30% de la matière sèche en septembre
Pour le pétiole : 0,44% à 3,85% de la matière sèche en septembre
Pour l'ensemble de la feuille : 3% de la matière sèche au début de la floraison
Pour l'ensemble de la feuille : 2% de la matière sèche à maturation.

Calcium - (Ca)

C'est un constituant essentiel des membranes végétales ; il forme des sels insolubles avec des acides organiques et les rend inactifs (BOUARD, 1966 - BRANAS, 1971).

Son absorption se fait sous forme d'ion Ca^{++}.

L'insuffisance en calcium réduit la croissance qui s'arrête précocement, détermine une chlorose internervaire suivie de nécroses ponctuelles près des bords des feuilles adultes. On note de plus un enroulement des jeunes feuilles précédant des nécroses avec une chute des sommets, une croissance réduite des racines, et enfin la mort de la plante dans les cas extrè-

mes (ÖZBEK, 1968).

L'excès de calcium dans le milieu de culture augmente le pH et entrave l'absorption du fer en l'insolubilisant. La chlorose ferrique causée surtout par l'excès de calcium est très répandue.

Tous les chercheurs ont constaté que la teneur en calcium des tissus augmente à mesure qu'ils prennent de l'âge et se différencient, de 1% à 6,4% de la matière sèche ; les teneurs moyennes du limbe, prélevé à des époques différentes de l'année, sont les suivantes (CARLES et Coll., 1964 - DIETRICH et Coll., 1964 - LAFON et Coll., 1964 - SAROSI, 1964):

Teneur minimum : 1,70% de la matière sèche
Teneur maximum : 3,76% de la matière sèche
Teneur moyenne : 2,55% de la matière sèche

Magnésium - (Mg)

Il entre dans la composition de la chlorophylle, de certaines enzymes, phosphorylases et carboxylases ; il forme avec le calcium les pectates calco-magnésiens des parois cellulaires (BRANAS, 1971 - RIBEREAU-GAYON et Coll., 1971 - DELMAS, 1971).

Son absorption se fait sous forme d'ion Mg^{++}.

L'insuffisance magnésienne se montre d'abord chez les feuilles âgées. Puis elle s'observe chez les jeunes feuilles. Les feuilles basales ont un jaunissement ou un rougissement marginal (BRECHBUHLER et Coll., 1968) qui avance rapidement en laissant des bandes vertes de chaque côté des nervures principales et secondaires, ce qui donne un aspect très découpé aux symptômes internervaires. Le jaunissement est plus intense que celui du calcium (DELMAS, 1971). Chez les cépages rouges, le jaunissement est remplacé par un rougissement. Pendant la véraison, en cas de carence, toutes les feuilles se décolorent, brunissent et meurent (BRANAS, 1971 - GALET, 1970 - DELMAS, 1971 - LEVY, 1964, 1970). On note une réduction de la fructification et un retard de la maturation (BRECHBUHLER et Coll., 1968 - SIMON et Coll., 1970).

L'excès du magnésium a des effets surtout par l'intermédiaire

des interactions alimentaires (Ca - Mg, K - Mg).

La teneur normale en magnésium des feuilles peut se situer aux environs de 0,26% de la matière sèche (LEVY, 1964 - DELMAS, 1971). Comme celle du calcium, elle augmente avec l'âge de la feuille (MAUME, 1951) et varie de 0,12% à 1,08 (SAMISH et Coll., 1960).

Pour de nombreux auteurs (BOVAY, 1958 - CARLES et Coll., 1964 - DIETRICH et Coll., 1964 - LAFON et Coll., 1964 - SAMISH et Coll., 1961), les teneurs moyennes en % de la matière sèche des feuilles, des limbes et des pétioles à la maturité sont:

pour la teneur minimale des feuilles entières : 0,12
pour la teneur maximale des feuilles entières : 0,63
pour la teneur moyenne des feuilles entières : 0,40
pour la teneur moyenne des limbes : 0,37
pour la teneur moyenne des pétioles : 0,65

2 - LES INTERACTIONS

Certaines interactions alimentaires peuvent avoir des effets favorables ou défavorables sur le développement des plantes.

Lorsque l'azote mis à la disposition de la plante (sutout des jeunes plantes) se trouve sous deux formes ioniques (NO_3^- et NH_4^+), la préférence est pour l'ion NH_4^+ à des pH élevés (DEJAEGERE, 1969 - DROUINEAU, 1953). L'absorption de ces deux ions se distingue avant tout par leur charge, de sorte que ces deux types différents d'ions sont obligés d'utiliser deux voies différentes pour pénétrer. De plus, ils diffèrent en ce qui concerne leur état de réduction (LINSER, 1958 - BLANC, 1963), c'est-à-dire qu'ils sont obligés de suivre, au moins au départ, des voies différentes dans le métabolisme. La concurrence de ces deux ions se produit au niveau de leur utilisation dans le métabolisme (LINSER, 1958 - RIBEREAU-GAYON et Coll., 1971)

NO_3^- peut être en concurrence avec d'autres anions, et NH_4^+

avec d'autres cations (DEJAEGERE, 1969) ; ces deux formes d'ions exercent une influence indirecte sur l'absorption des autres éléments. L'absorption de NH_4^+ dans le tissu racinaire est suivie de l'apparition d'ions H^+ qui concurrencent l'absorption de Mg^+ et l'entravent par conséquent. D'autre part, les ions NO_3^-, qui ne libèrent pas d'ions H^+ et suivent d'autres voies de métabolisme, causent une réduction des ions H^+ et par suite, favorisent l'assimilation de Mg^+ (MULDER, in LINSER, 1958). BLANC (1961) a montré chez diverses graminés que les interactions entre les ions nitriques et ammoniacaux sont complexes et que la présence d'une certaine proportion d'ions NH_4^+ permet d'augmenter le rendement. Pour les concentrations élevées en nitrate dans la solution nutritive on observe d'autre part une accumulation d'azote sous forme nitrique dans les tissus.

L'augmentation de la fertilisation azotée, en accroissant les capacités d'échange racinaire, favorise une absorption relativement plus importante des ions divalents que des ions monovalents (BLANC, 1967).

L'augmentation du taux d'azote du milieu diminue l'absorption du potassium (KOZMA et POLYAK, 1964 - LEVY, 1964).

Le phosphore est avant tout à la disposition des plantes sous forme ionique : $H_2PO_4^-$, HPO_4^{--}, PO_4^{---} . Après son absorption, il entre immédiatement dans des combinaisons organiques. Il aurait plutôt un effet favorisant l'assimilation des autres éléments. Lorsque le niveau du phosphore augmente dans le milieu alimentaire, de façon parallèle à l'accroissement du niveau de l'azote, la plante réagit favorablement : c'est-à-dire que l'augmentation du niveau alimentaire en phosphore exige aussi l'augmentation du niveau de l'azote (DELMAS, 1971 - BRANAS, 1962).

D'autre part, une forte dose de phosphore dans le milieu alimentaire provoque une carence manganique (DELMAS et Coll., 1959).

Le potassium est peut-être l'élément ayant les interactions les plus importantes avec d'autres éléments minéraux. Etant un élément très actif, dans le système vivant, il se trouve en particulier relié de manière di-

recte à la pénétration du calcium et du magnésium (LINSER, 1958).

L'action antagoniste du potassium et du magnésium est très connue chez la vigne. Cette action a été analysée d'après l'évaluation du rapport K/Mg dans la plante et dans la solution nutritive. Les valeurs normales de ce rapport se trouvent entre 4 et 7. En dessous de 4, il s'agit d'une insuffisance potassique ; à l'autre extrème, une insuffisance magnésienne (LEVY, 1971). Pourtant ces valeurs semblent pouvoir être élargies en rapport avec certaines conditions de milieu ou de cépage. GÄRTEL (1965) trouve que la carence potassique n'est atteinte que si le rapport K/Mg est inférieur à 1 et la carence magnésienne pour un rapport supérieur à 15.

Selon LEVY (1972), ce rapport évolue de la manière suivante :

- feuilles saines : K/Mg = 6/1 .
- déficience en Mg : K/Mg = 10/1 et Mg $\leq$ 0,20% de la matière sèche.
- déficience en K : K/Mg = 2/1 et K $\leq$ 0,70% de la matière sèche

Selon GÄRTEL (1965) :

- déficience en Mg : K/Mg = 15/1 et Mg $\leq$ 0,10% de la matière sèche.
- déficience en K : K/Mg = 1/1 et K $\leq$ 0,85% de la matière sèche.

EMMERT (in BOON V. der J., 1964) indique que le potassium diminue le taux de N, P, Ca, Mg dans la feuille. Mais la diminution de la teneur en N et P ne se manifeste pas toujours.

L'action du calcium se manifeste surtout au niveau cellulaire (LINSER, 1958). Son action "dégonflante" va à l'encontre de l'action hydratante du potassium. Il agit ainsi favorablement sur les fonctions du système si l'état d'hydratation est élevé, mais défavorablement si l'état de "gonflement" est bas.

II - CULTURES EN SOLUTIONS CONTROLEES

Bien que la première solution nutritive ait été réalisée par KNOP en 1868, c'est GERICKE qui a développé en 1929 et mis en pratique l'utilisation des cultures en solutions nutritives. Au même moment, d'autres chercheurs ont mis au point, à l'échelle pratique, la culture sur sable arrosé de solutions nutritives. La culture sur gravier imbibé par dessous, ou culture par sub-irrigation a été développée surtout aux U.S.A. et la culture sur gravier avec irrigation à niveau constant a été développée par des auteurs belges.

De nombreuses recherches expérimentales ont été réalisées dans des buts scientifiques et techniques.

En Californie, GERICKE (1940), après avoir réalisé de nombreux essais, a publié un véritable traité de cette culture, (The complete guide to soil-less gardening). En 1938, HOAGLAND et ARNON (HOAGLAND, 1944) ont fait une étude comparative et une excellente mise au point des divers procédés. Puis en 1938, ELLIS et SWANEY en 1953 ont réalisé une série de cultures sur gravier par sub-irrigation.

A Antibes, DROUINEAU (1953) a réalisé de remarquables travaux de recherche sur la nutrition et la fertilisation de plantes en cultures sur sable et gravier. Puis, CHOUARD (1954), HOMES et Coll. (1969), PENNINGSFELD et Coll.(1969) ont conduit de précieuses recherches aussi bien dans des buts pratiques que scientifiques. D'autre part, DELMAS (1971) a réalisé de nombreux essais sur la nutrition minérale des plantes cultivées en milieux artificiels.

L'utilisation de la culture en milieux artificiels a trouvé son application, dans une très large mesure, dans des recherches physiologiques.

De nombreux chercheurs ont réalisé et réalisent encore des essais sur la nutrition et la fertilisation des plantes en les cultivant sur des milieux artificiels.

En ce qui concerne la vigne nous citerons en particulier le très important travail de DELMAS (1971). Cet auteur utilise des solutions nutritives de composition ionique et de concentration saline totale très diverses puisqu'elles varient dans le rapport 1 à 10. Les plantes sont maintenues dans

des abris, serres qui les protègent alors du climat ; à la fin de chaque période de végétation les sujets sont extraits de leurs pots et conservés dans une cave naturelle à température basse et constante ; au printemps suivant les sarments et les racines sont taillés puis les plantes repiqués dans les pots pour une nouvelle saison de croissance. Cette méthode d'étude a permis à DELMAS de fournir des résultats intéressants que nous comparerons aux nôtres dans le cours de ce travail et de proposer une solution nutritive que nous mentionnerons plus loin.

L'application pratique de la culture sans sol ou hydroponique a été rapide. Les Etats-Unis, la Hollande, l'Italie, l'Allemagne, la Suède, la France, l'Israel et bien d'autres pays l'utilisent.

Les solutions nutritives employées pour les buts cités ci-dessus sont très nombreuses ; leurs compositions et leurs concentrations sont si différentes que la comparaison est parfois difficile ; nous essaierons néanmoins d'en analyser les variables essentielles.

La variation de la composition et de la concentration des solutions nutritives dépend du fait, généralement admis, que les exigences des plantes à cultiver sont différentes d'une part en fonction de l'espèce, et d'autre part en fonction de l'âge de la plante et des caractères des climats. Les exigences particulières permettent d'expliquer la multiplicité des solutions nutritives proposées. Pourtant certains chercheurs ont mis au point et continuent d'améliorer des solutions nutritives considérées comme polyvalentes.

III - DEFINITION DE QUELQUES SOLUTIONS NUTRITIVES

1 - SOLUTIONS PROPOSEES POUR DES CAS PARTICULIERS DE LA PRATIQUE HORTICOLE

Les solutions minérales utilisées dans la pratique horticole sont réalisées la plupart du temps, à partir des sels minéraux du commerce, ou même d'engrais solubles; elles sont préconisées par leurs auteurs pour certains climats ou pour certaines plantes comme la tomate, l'œillet, le rosier, etc...

Solution de MEIR-SCHWARZ (1961) recommandée sous climats arides.

Nitrate de chili (15,5% N)	750g
Superphosphate (38% P_2O_5)	350g
Sulfate de potasse (50% K_2O)	700g
Sulfate de magnésie (16% MgO)	450g
Sulfate de fer	5g
Borax	20g
Sulfate de cuivre	0,1g
Sulfate de zinc	0,2g
Sulfate de manganèse	1,0g

Total : 2476,3g pour $1m^3$ d'eau

Equilibre N - P - K : 1 - 1,1 - 2,9

En été, pour la même quantité de sel, la quantité d'eau est doublée. En hiver, au contraire, c'est la quantité du sel qui est doublée (MEIR-SCHWARZ, 1961). Cela veut dire que la concentration en sel varie de 1 à 4 selon la saison.

Solution de FARNHAM et WHITE

Elle donne d'excellents résultats pour les fleurs à couper : roses, œillets, gardenias (in PENNINGSFELD et Coll., 1969) :

Nitrate de chaux (15,5% N)	2430g
Sulfate d'ammoniaque (20% N)	150g
Phosphate monopotassique (35% K_2O)	385g

Sulfate de magnésie	270g

Total : 3435g pour $1m^3$ d'eau

Equilibre N - P - K : 1 - 0,36 - 0,25

Solution de la "California Experiment Station" (ELLIS et SWANEY, 1953)

Les professionnels américains utilisent surtout cette solution :

Nitrate de chaux (15,5% N)	720g
Nitrate de potasse (13,8% N - 46,6% K_2O)	660g
Phosphate monoammonique (17,7% N - 59,2% P_2O_5)	120g
Sulfate de magnésie	520g

Total : 2020g pour $1m^3$ d'eau

Equilibre N - P - K : 1 - 0,29 - 1,42

Pour assurer les besoins en oligoéléments des deux solutions ci-dessus, on ajoute en général les sels suivants :

Sulfate de fer	2,5 à 5,0g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de manganèse	1,0 à 2,0g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de cuivre	1,4 à 2,8g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de zinc	0,1 à 0,2g pour $1m^3$ de solution

Solution de HOAGLAND (1938)

Dans les conditions climatiques de l'Europe Centrale, elle semble avoir donné de bons résultats sur plus de cinquante plantes (PENNINGSFELD et KURZMANN, 1969).

Nitrate de potasse (13,8% N - 46,6% K_2O)	540g
Nitrate de chaux (15,5% N)	90g
Phosphate monocalcique (52,6% P_2O_5)	140g
Sulfate de magnésie	130g
Sulfate de fer	14g
Sulfate de manganèse	2g
Borax	1,7g
Sulfate de zinc	0,8g

Sulfate de cuivre	0,6g

Total : 919,1g pour 1m^3 d'eau

Equilibre N - P - K : 1 - 0,83 - 2,84

Solution de LUCK (1956)

Elle est particulièrement recommandée pour la culture des tomates.

Sulfonitrate d'ammonium	1000,0g
Nitrate de chaux (15% N)	692,0g
Nitrate de potasse (14% N - 46%K_2O)	315,0g
Superphosphate (17% P_2O_5)	692,0g
Patenkali (28% K_2O)	346,0g
Sulfate de fer	14,0g
Borax	5,0g
Sulfate de manganèse	2,5g
Sulfate de cuivre	0,1g
Sulfate de zinc	0,1g

Total : 3066,7g pour 1m^3 d'eau

Equilibre N - P - K : 1,0 - 0,29 - 0,59

Solution de STEINER (1958)

Elle est recommandée aussi pour la culture des tomates.

Nitrate de chaux (15,5% N)	900,0g
Nitrate de potasse (13,8% N - 46,6% K_2O)	440,0g
Sulfate d'ammoniaque (21% N)	10,0g
Super-double (38% P_2O_5)	250,0g
Patenkali (28% K_2O)	400,0g
Sulfate de magnésie	150,0g
Borax	10,0g
Sulfate de manganèse	5,0g
Sulfate de zinc	0,04g
Sulfate de cuivre	0,04g
Molybdate de sodium	0,125g

Total : 2129,205g pour 1m^3 d'eau

Equilibre N - P - K : 1 - 0,47 - 1,59

Solution de PENNINGSFELD (1969)

Cette solution donne de bons résultats avec les tomates, concombres, choux-raves, radis, chrysanthèmes, Gerbera, œillets nobles, roses, vesces, Freesia, Asparagus sprengeri.

Nitrate de chaux (15,5% N - 34,2% CaO)	868,0g
Nitrate de potasse (13,8% N - 46,6% K_2O)	416,0g
Sulfate d'ammonium (21% N)	10,0g
Phosphate monopotassique (35,8% K_2O - 51,7% P_2O_5)	248,0g
Sulfate de magnésie (16,4%MgO)	378,0g
Sulfate de fer (20,1% Fe)	20,0g
Borax (11,4% B)	10,0g
Sulfate de manganèse (34,5%Mn)	5,0g
Sulfate de zinc (22,7% Zn)	0,04g
Sulfate de cuivre (25,5% Cu)	0,04g

Total : 1991,08g pour 1 m^3 de solution

Equilibre N - P - K : 1 - 0,76 - 1,52

Solution de COIC et Mme C. LESAINT (1971)

Sels à utiliser pour la réalisation de cette solution :

nitrate de potassium	404,0g
nitrate de chaux sec	492,0g
ou cristallisé	708,0g
nitrate d'ammonium	160,0g
sulfate de magnésium cristallisé	184,5g
phosphate monopotassique	102,0g
phosphate bipotassique	43,5g
Total :	1386,0g/m^3 d'eau ou 1602,0g/m^3 d'eau

Source des oligoéléments :

Molybdate d'ammonium	: $(NH_4)_6Mo_7O_{24}, 4H_2O$	0,050g
Acide borique	: HBO_3	1,500g
Sulfate de manganèse	: $MnSO_4, 4H_2O$	2,000g
Sulfate de cuivre	: $CuSO_4, 5H_2O$	0,250g
Sulfate de zinc	: $ZnSO_4, 7H_2O$	0,500g
Séquestrène de fer	: (138 Fe)	10

Cette solution est pour les plantes "neutrophiles". Sa composition peut être exprimée en meg/l comme suivant :

	NO_3	PO_4	SO_4	Total
K	4	0,75 0,50		5,25
Ca	6			6
Mg			1,50	1,50
NH_4	2			2
H		1,50 0,25		1,75
Total	12	3	1,5	16,50

Les solutions ci-dessus contiennent tous les éléments majeurs nécessaires au développement des plantes citées. Par contre, (sauf la solution de STEINER) elles ne contiennent pas tous les oligoéléments considérés comme nécessaires. C'est le cas du molybdène, par exemple. On peut admettre que les sels et les éléments de support utilisés renferment assez de molybdène pour assurer une croissance normale.

En outre, la concentration en sels totaux de ces solutions est parfois très différente : la solution de HOAGLAND a une concentration de 919,1g de sels pour $1m^3$ d'eau, la solution de FARNHAM et WHITE en contient 3435,0g ; pourtant, elles peuvent être utilisées l'une à la place de l'autre pour certaines plantes. L'hétérogénéité est aussi très grande pour les équilibres N - P - K .

2 - SOLUTIONS PERMETTANT DE FIXER DE MANIERE TRES PRECISE LA COMPOSITION EN ELEMENTS MINERAUX

Des solutions minérales mises au point pour des essais scientifiques permettant de fixer de manière très précise la composition et la concentration en éléments minéraux et le pH sont toujours en usage. Dans ces solutions, un apport d'oligoéléments est nécessaire.

Solution de SACHS (1868)

Solution pour 1 litre d'eau distillée :

KNO_3	1g
$MgSO_4$	1g
$CaSO_4$	0,5g
$Ca_3(PO_4)_2$	0,5g
NaCl	0,25g
Sulfate ferrique	trace

Concentration totale : 3,250g/l

Solution de KNOP (1865)

Solution pour un litre d'eau distillée :

KNO_3	0,25g
$Ca(NO_3)_2$	1g
KH_2PO_4	0,25g
$MgSO_4$	0,25g
Chlorure ferrique	trace

Concentration totale : 1,750g/l

Les deux solutions nutritives ci-dessus ont des concentrations globales supérieures à celles des solutions généralement utilisées à l'heure actuelle. Leur utilisation est encore fréquente mais une dilution est le plus souvent jugée nécessaire.

Solution de HOAGLAND-ARNON I. (1950)

Nitrate de potassium	0,505g/l
Nitrate de calcium	0,820g/l
Phosphate monopotassique	0,136g/l
Sulfate de magnésium	0,240g/l

Concentration totale : 1,701g/l

Equilibre ionique N-S-P/K-Ca-Mg : 68-18-14/30-50-20

Anions/cations : 1,10

Solution de HOAGLAND et ARNON II. (1950)

Nitrate de potassium	0,606g/l
Nitrate de calcium	0,656g/l
Phosphate monoammonique	0,115g/l
Sulfate de magnésium	0,240g/l

Concentration totale : 1,617g/l

Equilibre ionique : 68-18-14/33-44-22

A/C : 1,22

Cette solution diffère de la précédente par le fait qu'elle contient 6,7% de l'azote total sous forme ammoniacale et le reste sous forme nitrique.

Solution du CERA I. (HOMES, 1969)

Elle est recommandée pour les légumes foliacés cultivés à la belle saison.

Nitrate de potassium	0,604g/l
Nitrate de calcium	0,635g/l
Nitrate de magnésium	0,172g/l
Sulfate de magnésium	0,325g/l
Phosphate monopotassique	0,240g/l

Concentration totale : 1,976g/l

Equilibre ionique : 60-20-20/33-33-33

A/C : 1,15

3 - SOLUTIONS MINERALES PARTICULIEREMENT ADAPTEES A LA VIGNE

Les solutions minérales particulièrement adaptées à la culture de la vigne sont relativement peu nombreuses. En dehors de leurs apports à la connaissance générale de la nutrition minérale de cette plante, elles ont reçu des applications, soit en vue de produire des semis à mise à fruit rapide dans le but d'accélérer la séléction des nouvelles variétés (Colmar), soit en vue de produire du raisin de contre-saison (La Hulpe).

Solutions de HUGLIN et JULLIARD (1964)

Solution A : (voir annexe : tableau 7).

Nitrate de calcium	400,0g pour $1m^3$ de solution
Nitrate de potassium	300,0g pour $1m^3$ de solution
Nitrate de sodium	100,0g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de magnésium	300,0g pour $1m^3$ de solution
Acide phosphorique(85%)	100,0cm^3 pour $1m^3$ de solution
Sulfate d'ammonium	400,0g pour $1m^3$ de solution

Concentration totale : 1600,0g pour $1m^3$ de solution

Oligoéléments :

Acide barique	1,5g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de zinc	0,5g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de manganèse	1,5g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de cuivre	0,5g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de fer	1,0g pour $1m^3$ de solution

Concentration ionique de la solution :
10,94 - 8,68 - 5,54/7,92 - 5,2 - 6,3

A/C : 1,33

Eau utilisée : eau déminéralisée

pH de la solution : 6,3 à 6,5

Solution B :

Nitrate de potassium	800,0g pour $1m^3$ de solution
Phosphate biammoniacal	200,0g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de magnésium	300,0g pour $1m^3$ de solution
Acide sulfurique(concentré)	50,0cm^3 pour $1m^3$ de solution

Sulfate de fer	5,0g pour $1m^3$ de solution

Le calcium est apporté par l'eau de la ville de Colmar.

Oligoéléments :

Acide barique	1,5g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de zinc	0,5g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de manganèse	1,5g pour $1m^3$ de solution
Sulfate de cuivre	0,25g pour $1m^3$ de solution

pH de la solution : 6,3 à 6,5

eau utilisée : eau de la ville de Colmar

La composition des deux solutions ci-dessus est différente. De plus, pour la solution A, on utilise de l'eau déminéralisée, pour l'autre de l'eau de la ville de Colmar.

Avec ces solutions de HUGLIN et JULLIARD des résultats excellents ont été obtenus ; elles ont permis de mettre au point une technique de production de plants de semis très vigoureux, avec surtout des possibilités de mise à fruits précoce (premières grappes mûres obtenues 9 mois après la germination).

Solution de DELMAS (1971)

DELMAS a préconisé, après de longues années de recherches, une solution nutritive pour Vitis vinifera, Variété Merlot. La composition de cette solution est la suivante :

N	de 80 à 100mg/litre de solution
P	de 10 à 15mg/litre de solution
K	de 40 à 60mg/litre de solution
Ca	de 120 à 140mg/litre de solution
Mg	de 15 à 20mg/litre de solution

Oligoéléments :

Mn	0,55mg/litre de solution
Cu	0,07mg/litre de solution
Zn	0,06mg/litre de solution
B	0,32mg/litre de solution
Mo	0,02mg/litre de solution
Fe	0,48mg/litre de solution (sous forme de Fe-EDDHA)

pH de la solution : 5,5 à 6,0

Solution de la HULPE

Les solutions utilisées par la station de recherches scientifiques agricoles et viticoles à la HULPE sont les suivantes :

N	S	P	K	Ca	Mg	
60	20	20	40	30	30	A/C : 1,2
52	24	24	40	30	30	Concentration ionique totale : 46mg/l
40	24	24	52	30	30	A/C : 0,66
						Concentration ionique totale : 46mg/l

pH de ces solutions : 8,5

L'équilibre des solutions ci-dessus étant difficile à réaliser techniquement par suite de la faible solubilité des sels à pH 8,5, la dose des produits est fractionnée en 3 parties et ajoutée successivement à intervalle de 2 ou 3 semaines. De plus, un contrôle continu de leur composition est nécessaire surtout au niveau du fer et du phosphore.

DEUXIEME PARTIE

NUTRITION MINERALE DE LA VIGNE EN CULTURE HYDROPONIQUE

MATERIEL ET METHODES

A - MATERIEL VEGETAL

Toute notre expérimentation a porté sur Vitis vinifera cépage Pinot noir. Ce cépage est assez peu fertile. La vigueur du rameau et le niveau d'insertion des bourgeons influent de manière très nette sur la grandeur de la fertilité. Nous avons choisi nos boutures de départ en tenant compte de deux caractères : elles sont prélevées sur des rameaux suffisamment vigoureux et ne concernent que les bourgeons de la partie médiane du sarment (rang 4 à 7).

Les caractéristiques moyennes de nos boutures sont les suivantes :

Poids : 9,68g

Longueur : 15,8cm

Diamètre : 7,7mm

Chaque bouture intéresse un entre-nœud complet ; le bourgeon porté par le nœud inférieur est enlevé, ce sera donc le bourgeon du nœud supérieur qui produira la pousse, objet de notre étude (fig. 1).

Nos trois expérimentations annuelles ont eu chaque fois comme point de départ des boutures de ce type.

Afin d'augmenter l'homogénéité du matériel en expérience, nous avons planté deux boutures dans chaque bac de culture. Quelques temps après le débourrement, la bouture qui s'éloigne le plus de l'état moyen de l'ensemble est enlevée.

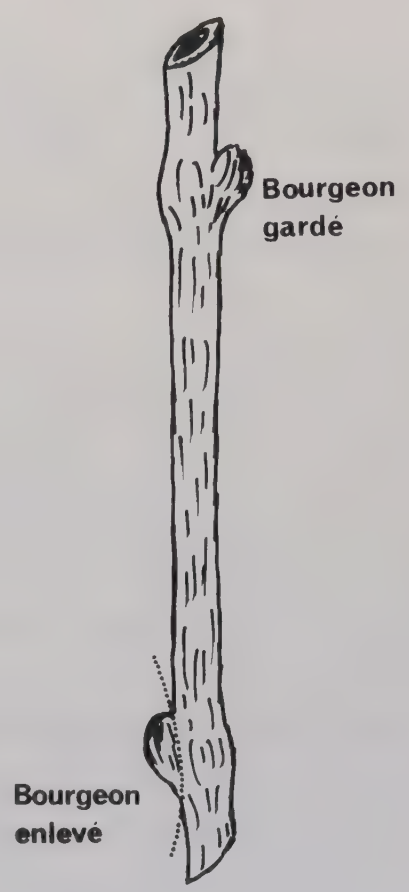


Figure 1 : bouture utilisée

B - METHODES

Nous avons réalisé une installation de système de culture à liquide percolant récupéré conformément à la figure 2.

I - DESCRIPTION DE L'INSTALLATION DE CULTURE HYDROPONIQUE

Bacs de solution : ils sont en plastique et ont une forme rectangulaire de 55 x 38 x 22cm, ce qui leur donne un volume de 46 litres.

Bacs de culture : pour chaque bac de solution, nous avons mis 5 bacs de culture en plastique. Leurs dimensions sont les suivantes : 25 x 17 x 12cm ; leur volume est donc de 5,1 litres. Nous les avons inclinés de 3° environ pour assurer l'écoulement du liquide.

Pompes : les pompes fonctionnent 3 minutes par heure et chaque bac de culture reçoit à peu près 3 litres de solution nutritive à chacun des 24 cycles journaliers.

Système de circulation : il est constitué de tuyaux en plastique noircis pour empêcher le développement des algues.

Substrat : tous les bacs de culture contiennent 4 couches différentes :

- au fond, une couche de 2cm de brique pilée
- une couche de 3cm de sable grossier (Ø 2,5 à 3 mm)
- une couche de 4cm de sable moyen (Ø 1,5 à 2,5 mm)
- une couche superficielle de 2cm de sable à grain fin (Ø 0,8 à 1,5 mm).

Le sable siliceux pur et la brique pilée que nous avons utilisés ont été choisis de manière à modifier le moins possible la composition de la solution nutritive. Nous avons fait fonctionner l'installation d'abord avec de l'eau distillée, puis avec les solutions nutritives avant de mettre en place les boutures.

Aucun dispositif d'aération particulier n'a été jugé utile, parce qu'

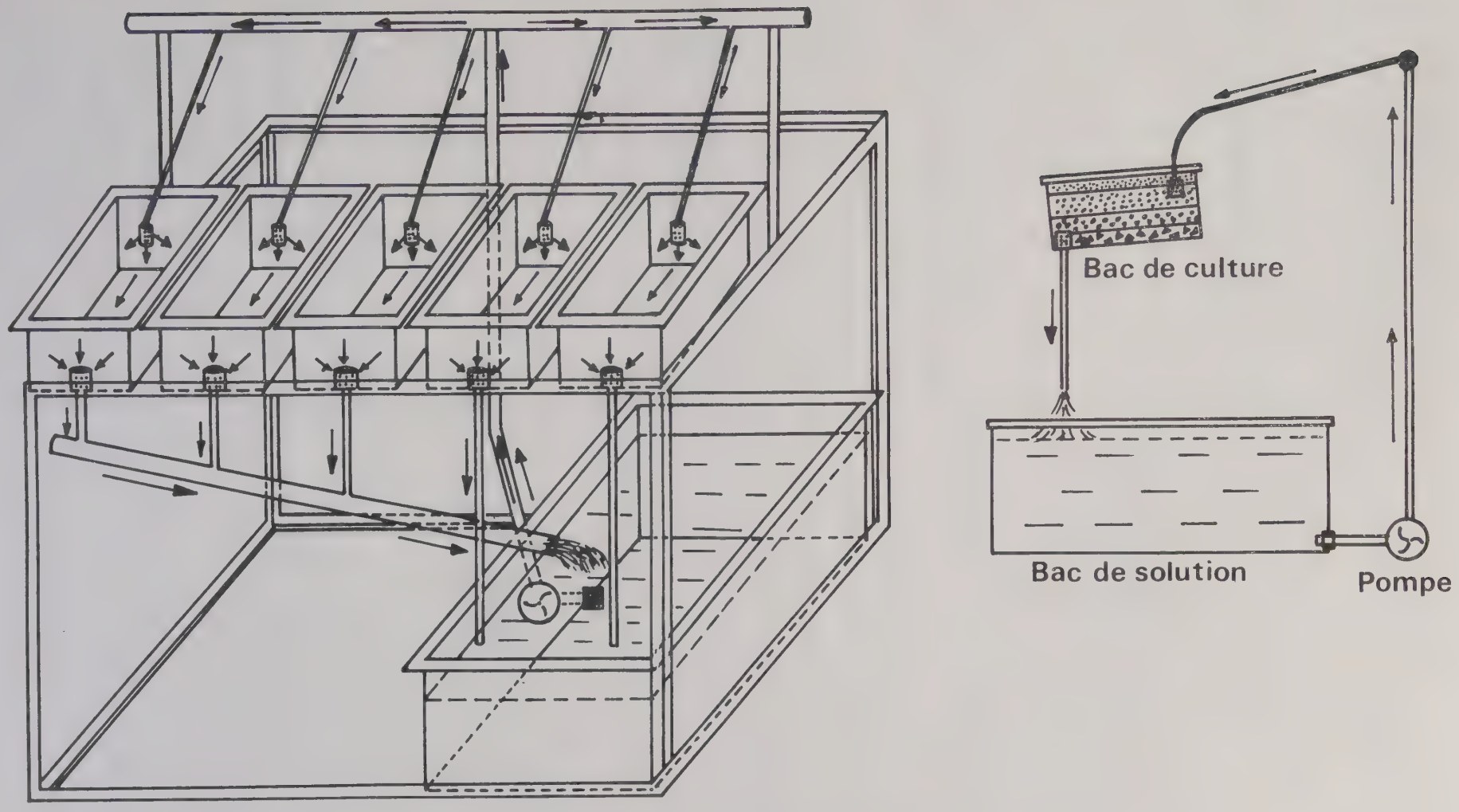


Figure 2: Schéma du système de culture à liquide percolant récupéré.

au cours de leur trajet, les solutions nutritives s'aérent abondamment et que, de plus, le substrat étant très percolant, il retient relativement peu de solution.

II - SOLUTIONS NUTRITIVES

Nous avons retenu 9 solutions contenant des proportions différentes des éléments majeurs en vue de déterminer leur effet sur la croissance et le développement du Pinot noir. 6 d'entre elles ont été définies en faisant varier de manière systématique la teneur en éléments, les 3 autres ont été choisies comme référence, parce qu'elles ont été mises au point par des chercheurs travaillant sur la vigne.

Les 6 solutions variant de manière systématique ont été définies en prenant comme base le travail de HOMES (1953) permettant une étude de l'influence des éléments principaux sur la croissance.

Les 3 solutions de référence sont la formule de HUGLIN et JULLIARD (1964) préconisée pour la vigne, celle mise au point à Dijon par BECQUET (1968) dérivée de la précédente et enfin une solution passe-partout qui, selon HOMES (1953) donnerait de bons résultats dans un très grand nombre de cas.

Pour les solutions expérimentales, les concentrations ioniques en 6 éléments majeurs ont été établies conformément aux tableaux 1 et 2. Elles permettent de conserver l'équilibre anions/cations.

Sources des éléments nutritifs :

- éléments majeurs :

La liste des produits utilisés peut se dresser comme suit :

- N est fourni par $(NO_3)_2Ca, 4H_2O$ - NO_3K - $(NO_3)_2Mg, 6\,H_2O$ - HNO_3 - $(NH_4)_2HPO_4$ - $NH_4H_2PO_4$.
- S est fourni par $SO_4Mg,\ 7H_2O$ - SO_4K_2 - SO_4H_2.
- P est fourni par PO_4H_2K - PO_4H_3 - $(PO_4H_2)_2Ca, H_2O$ - PO_4HK_2 - $PO_4H(NH_4)_2$ - $PO_4H_2NH_4$.

solutions nutritives \ ions	NO_3	SO_4	PO_4	K	Ca	Mg
1 - Azote	15	5	5	7	7	7
2 - Soufre	5	15	5	7	7	7
3 - Phosphore	5	5	15	7	7	7
4 - Potassium	8,3	8,3	8,3	12,6	4,2	4,2
5 - Calcium	8,3	8,3	8,3	4,2	12,6	4,2
6 - Magnésium	8,3	8,3	8,3	4,2	4,2	12,6
7 - Huglin	10,94	8,68	5,54	7,92	5,2	5,01
8 - Homès	15	5	5	6,3	8,4	6,3
9 - Becquet	9,93	8,68	3,02	7,92	5,2	5,01

Tableau 1 : Composition ionique des solutions nutritives (en meg/1).

Nous parlerons des particularités de chaque solution nutritive dans des pages suivantes. Nous les appelerons par le nom de l'élément sur lequel l'accent est mis dans la solution.

solutions nutritives \ éléments minéraux	N	S	P	K	Ca	Mg
1 - Azote	210	80	51,6	273	140	84
2 - Soufre	70	240	51,6	273	140	84
3 - Phosphore	70	80	155	273	140	84
4 - Potassium	116	133	86	492	84	50
5 - Calcium	116	133	86	164	252	50
6 - Magnésium	116	133	86	164	84	150
7 - Huglin	153	139	56	309	104	60
8 - Homès	210	80	51,6	246	168	76
9 - Becquet	139	138	31	309	250	60

Tableau 2 : Concentration des éléments minéraux dans les solutions nutritives (exprimée en mg/1).

- K est fourni par NO_3K - PO_4H_2K - SO_4K_2 - KOH - KCl.
- Ca est fourni par $(NO_3)_2Ca, 4H_2O$ - $(PO_4H_2)_2Ca, H_2O$.
- Mg est fourni par $SO_4Mg, 7H_2O$ - $(NO_3)Mg, 6H_2O$.

Les solutions mères de chaque sel, concentrées 20 fois ont été effectuées à partir des produits RP avec de l'eau distillée.

Pour la solution 9, nous avons utilisé de l'eau de ville de Dijon dont la composition était la suivante :

éléments	ppm
Ca^{++}	250
Mg^{++}	15
Cl^-	7 - 10
Cl_2 (dissous)	0,01
SO_4^{--}	20 - 22
Silice	2,5 - 2,55
Cu^{++}	0,2 - 0,3
Mn^{++}	0,1
Fe^{+++}	0,2

- <u>éléments mineurs</u> :

Nous avons utilisé la formule de SHIVE et ROBBINS dont la composition est la suivante (in HOMES, 1953) :

produits	concentration(mg/l)
Acide borique H_3Bo_3	3
Sulfate de zinc $SO_4Zn, 7H_2O$	1
Sulfate de manganèse $SO_4Mn, 4H_2O$	2,27
Sulfate de cuivre $SO_4Cu, 5H_2O$	0,5
Molybdène	0,02

Les solutions mères d'oligoéléments ont été effectuées aussi à partir de produits RP. Le fer a été apporté sous forme de chélate Fe-EDTA (*) (JACOBSON, in HEWITT, 1966).

Jusqu'à la fin du débourrement, nous avons utilisé des solutions diluées de moitié. Après le débourrement, la concentration indiquée a tou-

---

(*) la méthode de chélation du fer a été décrite dans un précédent travail (ECEVIT, 1972).

jours été mise à la disposition des plantes.

Chaque semaine, jusqu'à la fin de l'expérience, nous avons remplacé les solutions après avoir rincé les bacs de solution à l'eau distillée pour éliminer les sels précipités surtout aux niveaux supérieurs. A partir de juillet, la surface foliaire étant importante, nous avons dû compléter les solutions nutritives au volume de départ avec de l'eau distillée avant la fin de chaque semaine. Le pH de toutes les solutions est ajusté à $6 \pm 0,2$.

III - CONDITIONS CLIMATIQUES DES CHAMBRES DE CULTURES

Température : la température a été maintenue entre 24 et 26°C pendant toute la durée de l'expérience avec un système automatique.

Humidité : l'humidité de la chambre a été maintenue aux environs de 75%.

Lumière : l'éclairement au niveau des plantes a été de l'ordre de 13 000lux. Nous avons utilisé des lampes à incandescence et des lampes à fluorescence dont la courbe de répartition spectrale est indiquée dans la figure 3.

IV - METHODE D'ANALYSE

Préparation de la matière végétale en vue de l'analyse :

Nous avons prélevé les échantillons à la fin de la culture. Toutes les feuilles, les rameaux verts, les rameaux aoûtés et les racines préalablement pesés sont mis séparément dans des sacs en plastique et en chambre froide pendant une nuit au maximum, puis séchés à l'étuve électrique à 105°C avec ventilation, ce qui permet de doser l'humidité et de broyer tous les échantillons secs avec un broyeur-tamiseur afin de contrôler la finesse des poudres. Nous avons utilisé un tamis ayant une maille de 1mm. Le reliquat fibreux refusant de passer par ces mailles était découpé aux ciseaux en petits fragments.

Méthodes d'analyse utilisées :

Tous les éléments minéraux principaux ont été analysés dans les

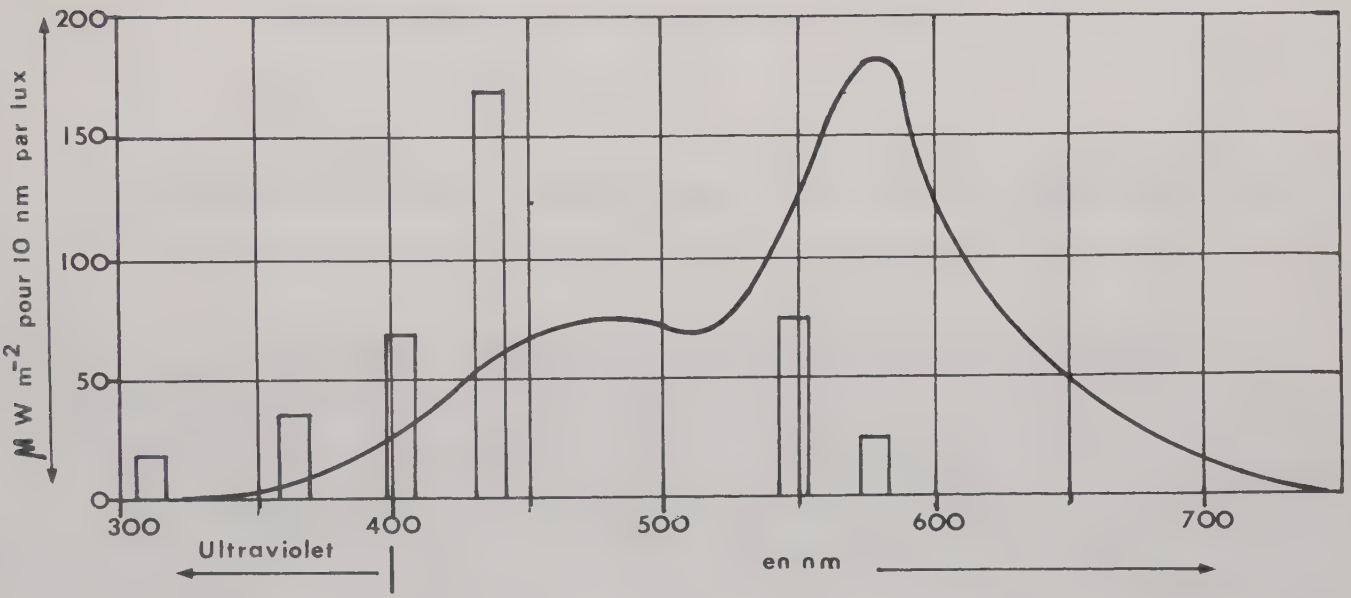


Figure **3** : courbe de répartition spectrale des tubes TL 33, blanc industrie, (philips éclairage, 1969)

T = 4200°K (température de la couleur)
R8 = 66 (indice de rendu des couleurs)
P.S. : les rectangles correspondent à l'energie venant des raies du mercure et la courbe à l'énergie venant de la couche fluorescence.

solutions nutritives et les tissus végétaux. Les méthodes d'analyse utilisées pour effectuer le dosage sont celles acceptées par les laboratoires membres du comité inter-institut (PINTA M., 1968).

- L'azote a été dosé par la méthode de Kjeldahl avec l'appareil semi-automatique de BOUAT.
- Le phosphore a été dosé par une méthode spectrophotométrique (phospho-vanado-molybdique).
- Le soufre a été dosé par une méthode spectrophotométrique (turbidimétrie du sulfate de baryum).
- Le potassium, le calcium et le magnésium ont été dosés par la méthode de spectrophotométrie à absorption atomique avec un appareil de PERKIN-ELMER.

V - PRESENTATION DES CARACTERES BIOLOGIQUES OBSERVES ET MESURES.

Nous avons réalisé d'une part des observations globales, telles que la notation de la date de débourrement, de la date de floraison, de l'évolution de l'aoûtement et de l'apparition des symptômes de carence avec leurs caractéristiques et d'autre part, des mesures précises relatives à la vitesse de croissance des rameaux, à la consommation de solutions, à l'évolution de la concentration en éléments minéraux.

Pendant toute la première partie de l'expérience, c'est-à-dire tant que les rameaux ont moins de 2 mètres de longueur, nous avons relevé leur longueur 2 fois par semaine pendant la première année et une fois pendant les deux années suivantes ; mais, en raison de la difficulté de cette mesure vers la fin de l'expérience, nous avons espacé ces relevés.

La mesure du pH a été effectuée 2 fois par semaine et au besoin on a ajusté le pH de la solution avec de l'acide sulfurique.

Pour déterminer l'évolution de la concentration en éléments minéraux, nous avons fait 3 prélèvements d'échantillon de solution pendant une période de 15 jours au mois de juillet à un moment où les plantes avaient atteint un état de développement important et une vitesse de croissance maximum.

D'autre part, le jour de l'interruption de l'expérience, nous avons mesuré le diamètre des rameaux au niveau du premier entre-noeud bien développé, ainsi qu'au niveau d'un entre-noeud de la partie moyenne du rameau.

Informations complémentaires concernant nos cultures :

- durée de l'expérience :

en 1971 : 172 jours

en 1972 : 127 jours

en 1973 : 122 jours

- traitements antiparasitaires :

Ayant constaté la présence d'araignées rouges sur les feuilles, nous avons effectué des traitements acaricides au dicofol peu de temps après le débourrement.

RESULTATS

Le plan retenu pour la présentation de nos résultats nous a conduit à présenter en premier les solutions nutritives et l'évolution de leur composition chimique sous l'influence de la culture . Dans un deuxième volet, nous nous proposons d'étudier l'évolution du pH puis dans un troisième temps les résultats "biologiques" de ces solutions nutritives, c'est-à-dire leur influence sur la croissance et le développement des plantes . Enfin nous présenterons les résultats que nous avons obtenus dans le domaine analytique sur la synthèse de matière organique par les plantes c'est-à-dire sur les caractères de la transformation d'éléments minéraux en molécules organiques (sur le plan quantitatif et qualitatif) en rapport avec les équilibres minéraux fournis dans les solutions nutritives .

RESULTATS

A - EVOLUTION DE LA COMPOSITION MINERALE DE SOLUTIONS NUTRITIVES

Les différentes espèces de plantes absorbent les éléments minéraux dans des rapports variables ; par exemple, depuis LAGATU et MAUME, on sait que chez la vigne la teneur en azote est dominante par rapport à celles des autres éléments alors que chez la pomme de terre c'est la potasse qui domine nettement.

Dans la plupart des cas, il n'y a pas de relation simple et directe entre la composition du milieu nutritif et l'absorption des éléments minéraux, c'est-à-dire finalement la composition minérale de la plante. C'est le cas, par exemple des algues : l'eau de mer contient plus de Na^+ que de K^+ mais les algues renferment plus de K^+ que de Na^+.

I - EVOLUTION DE LA CONCENTRATION GLOBALE DES SOLUTIONS NUTRITIVES ET CONSOMMATION D'EAU PAR LES PLANTES

Le tableau 3 nous indique la quantité d'eau consommée en 15 jours(*) à partir de 40 litres de solution fournis à chaque lot de plantes. Le calcul nous a permis de constater que la quantité d'eau consommée journellement était comprise entre 1667 et 2333cm^3.

Il existe deux sources de variabilité dont nous n'avons pas tenu compte et qui, dans les conditions de l'expérience ont probablement agi en sens inverse l'une de l'autre. Le premier de ces facteurs tient à l'état de dé-

---

(*) Ces 15 jours se situent du 10 au 24 juillet 1973. Ils ont été choisis à un moment où les plantes avaient déjà un développement végétatif important et se trouvaient en cours de croissance active (figure 8). A l'occasion de cette expérimentation les solutions ont été laissées en circuit pendant 15 jours au lieu de 7 afin de mieux cerner les variations dont elles étaient l'objet.

N° de la solution	solution évapotranspirée (en litres ; en 15 jours)	évapotranspiration journalière (en litres)
1	29	1,933
2	31	2,067
3	28	1,867
4	28	1,867
5	29	1,933
6	25	1,667
7	34	2,333
8	28	1,867
9	28	1,867

tableau 3 : évolution des volumes des différentes solutions nutritives

veloppement des différentes plantes ; en effet, la consommation d'eau est proportionnelle à la surface foliaire et cette surface n'était pas identique dans tous les cas. Le deuxième de ces facteurs tient au fait que l'eau est de moins en moins facilement prélevée par la plante à mesure que la concentration saline augmente, c'est-à-dire que les plantes ayant consommé beaucoup d'eau au début voient la possibilité d'absorption d'eau de plus en plus freinée. La solution 7 (HUGLIN) par exemple est réduite au volume de 6 litres en fin d' expérience avec une concentration d'environ 3,5g par litre de sels totaux , c' est-à-dire une concentration équivalente à 2 ou 3 fois celle de départ (voir tableau 4).

Il serait relativement facile d'imaginer des protocoles expérimentaux permettant de tenir compte de ce facteur d'erreur, soit par exemple en rajoutant de l'eau de manière à maintenir constante la teneur en sels totaux, soit simplement en mesurant la quantité d'eau absorbée journellement de manière à pouvoir connaître l'influence du facteur concentration.

Nous savons que dans les conditions naturelles le coefficient de transpiration de la vigne est de l'ordre de 500, c'est-à-dire que pour synthétiser un gramme de matière sèche contenant environ 60 milligrammes d'élé-

ments minéraux principaux, il faut 500 grammes d'eau. Or dans 500 grammes de solution nutritive, nous fournissons au départ à peu près 400 milligrammes d'éléments principaux. La concentration est donc 6 ou 7 fois supérieure à celle qui découlerait d'un calcul reliant le passage de l'eau à celui des éléments minéraux. Il n'est pas étonnant que l'on observe alors une augmentation de la concentration des solutions nutritives au cours de leur utilisation. Il apparaît alors à l'évidence que le seul moyen d'obtenir une solution nutritive dont la concentration globale resterait à peu près stable au cours de la culture serait de l'établir en utilisant comme base le coefficient de transpiration de la plante considérée.

II - EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN ELEMENTS MINERAUX DES SOLUTIONS NUTRITIVES EN FONCTION DU TEMPS

Le tableau 4 nous donne les résultats concernant l'évolution de la concentration en éléments minéraux principaux des solutions nutritives, sur lesquelles pousse la vigne, en fonction du temps. Seul l'azote pour lequel nous avons rencontré des difficultés de dosage dans les solutions ne figure pas dans ces résultats.

La composition minérale des solutions nutritives nous apparaît être très instable sous l'influence de la plante. Nous constatons que le prélèvement, même en quantité assez réduite, de certains ions par la plante, produit un déséquilibre chimique de la solution et conduit dans certains cas à des variations très importantes de celle-ci, cette modification n'étant pas raisonnablement imputable de manière directe à l'absorption par la plante.

Afin de rendre les résultats plus faciles à appréhender, nous indiquons dans le tableau 5 d'une part les quantités totales de chaque élément fourni au départ dans les solutions nutritives et d'autre part la quantité des éléments ayant disparu de la solution nutritive au bout de 15 jours de culture. Le terme "disparu" est volontairement imprécis car il recouvre à la fois la quantité d'élément absorbé par la plante et celle qui ne se trouve plus dans la solution parce qu'elle a été précipitée.

L'absorption d'un ion par la plante entraîne un changement de pH,

solutions		éléments minéraux S	P	K	Ca	Mg
Azote	d	80,2	51,4	272,6	140,2	83,1
1	m	105,0	20,8	407,1	206,8	161,1
	f	256,3	18,5	710,0	308,0	290,0
Soufre	d	238,7	51,2	274,8	140,4	83,9
2	m	251,4	37,0	380,0	205,0	121,0
	f	579,2	5,5	586,0	266,3	201,5
Phosphore	d	80,6	156,1	273,4	140,1	83,6
3	m	210,0	178,4	312,5	119,2	143,4
	f	215,6	427,5	642,0	336,8	222,6
Potassium	d	134,1	86,0	492,8	83,8	50,3
4	m	160,3	178,4	615,8	97,1	71,5
	f	372,0	234,3	1287,0	193,8	139,8
Calcium	d	133,4	86,2	164,1	254,0	50,0
5	m	215,6	42,9	270,6	283,2	126,4
	f	394,6	33,2	354,8	586,0	142,5
Magnésium	d	133,6	86,1	163,8	84,4	150,3
6	m	263,2	85,6	151,0	83,6	164,1
	f	347,3	218,6	382,6	180,8	390,0
HUGLIN	d	138,6	55,8	311,0	104,3	59,7
7	m	276,1	55,8	382,3	150,4	102,0
	f	451,3	171,6	996,6	226,3	185,5
HOMES	d	80,0	52,0	246,1	168,6	76,4
8	m	108,5	50,3	301,0	169,0	111,0
	f	213,4	41,0	594,7	358,3	208,1
BECQUET	d	139,2	31,2	209,5	253,6	60,2
9	m	265,3	33,9	280,6	471,5	105,1
	f	355,0	28,0	431,6	574,2	147,5

d : concentration au début de la période
m : concentration au milieu de la période
f : concentration à la fin de la période

Tableau 4 : Evolution de la concentration en éléments minéraux des solutions nutritives en fonction du temps pendant une période de 15 jours, du 10 - 7 - 1972 au 24 - 7 - 1972 (exprimée en mg/l).

Solutions nutritives	Eléments minéraux									
	Soufre		Phosphore		Potassium		Calcium		Magnésium	
	quantité fournie	quantité perdue	quantité fournie	quantité perdue	quantité fournie	quantité perdue	quantité fournie	quantité perdue	quantité fournie	quantité perdue
1 - Azote	3208	381	2056	1853	10904	3094	5608	2220	3324	134
2 - Soufre	9548	4336	2048	1999	10992	5718	5616	3220	3356	1543
3 - Phosphore	3224	637	6244	1114	10936	3232	5604	1562	3344	673
4 - Potassium	5364	900	3440	628	19712	4268	3352	1026	2012	334
5 - Calcium	5336	995	3448	3083	6564	2661	10160	3714	2000	433
6 - Magnésium	5344	3261	3444	165	6552	813	3376	664	6012	162
7 - HUGLIN	5544	2296	2232	1203	12440	6461	4172	2815	2388	1275
8 - HOMES	3200	639	2080	1588	9844	2708	6744	2445	3056	559
9 - BECQUET	5568	1308	1248	912	8380	3201	10144	3254	2408	638

Tableau 5 : Quantité d'élément disparu de la solution nutritive après 15 jours de culture par rapport à la quantité fournie dans les 40 litres de solution de départ (du 10 - 7 - 1972 au 24 - 7 - 1972; exprimée en mg).

soit en augmentation, soit en diminution. Cette modification du pH peut entraîner une précipation de certains éléments.

De plus la simple augmentation de concentration de la solution nutritive due à l'absorption de l'eau peut produire ou tout au moins favoriser des précipitations.

Le tableau 5 montre que dans tous les cas, la quantité d'élément ayant quitté la solution au bout de 15 jours de culture est assez importante, le plus souvent de l'ordre de 1/3 ou de la moitié de la quantité apportée au départ. Deux éléments ont un comportement un peu particulier : le phosphore qui réagit très différemment selon les solutions et le magnésium dont la teneur à la fin de la période de 15 jours est relativement peu différente de celle de départ.

Pour bien montrer l'évolution de la concentration en éléments minéraux nous avons réalisé les courbes de la figure 4 qui permettent une première analyse des résultats fournis dans les tableaux 3 et 4. Cette figure schématise la teneur finale des solutions en chaque élément par rapport à la teneur de départ. Elle indique donc si l'élément considéré s'est concentré ou dilué au cours de la culture. Elle a été obtenue d'après les valeurs du rapport f/d (f étant la concentration finale de chaque élément et d la concentration de départ). Quand on observe une augmentation de la concentration, cela indique nécessairement que l'eau est absorbée en quantité relativement plus grande que les éléments minéraux. Quand il y a diminution de la concentration, il ne nous est pas encore possible de connaître la part de l'absorption et celle de la précipitation.

La figure 4 montre à l'évidence que seule la concentration du phosphore diminue ; cette diminution est particulièrement intense dans la solution 2 (soufre) où la teneur en fin de culture est près de 10 fois plus faible qu' au début ; elle est moins intense, mais toujours très nette, dans les solutions 1 (azote), 5 (calcium), 8 (HOMES), 9 (BECQUET). Il faut rappeler ici que la solubilité des phosphates est très sensible au pH et que la précipitation de cet élément est un accident classique lors de la confection et de la conservation des solutions nutritives.

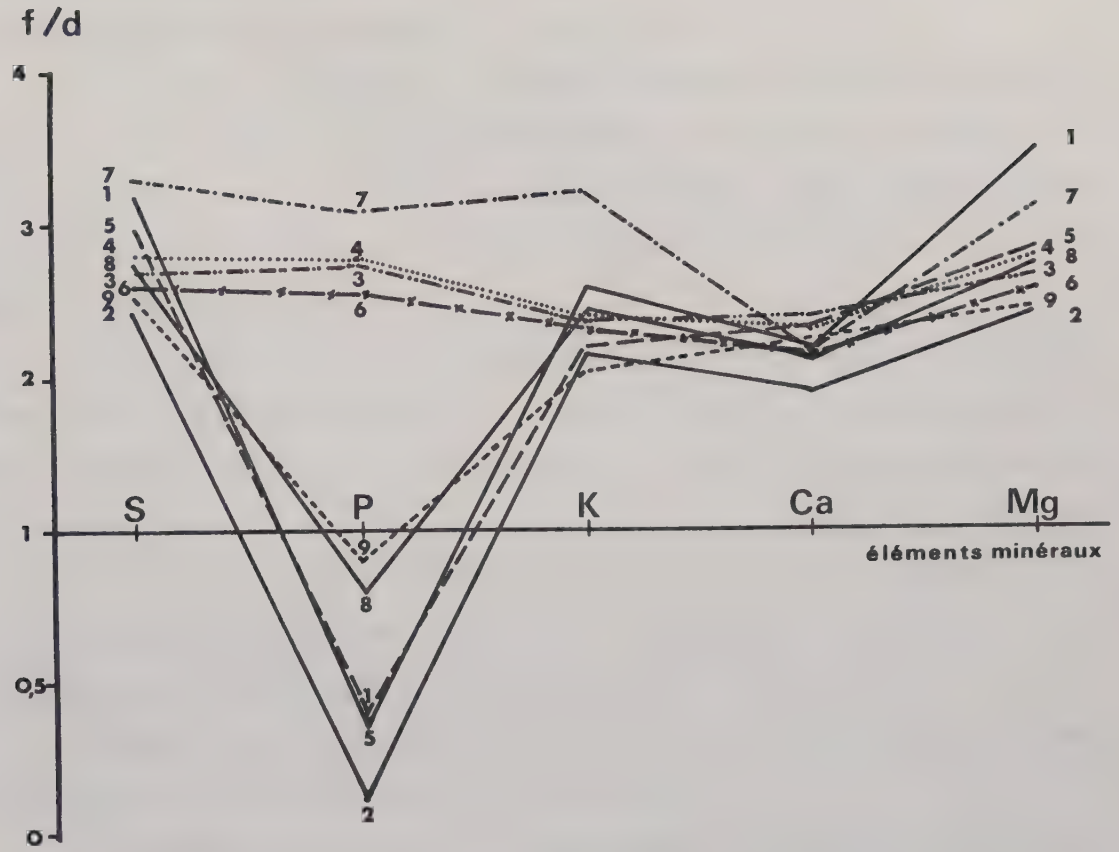


Figure 4 : illustration graphique des rapports f/d des solutuion nutritives.

f : concentration finale de l'élément considéré en fin de la période de 15 jours.

d : concentration initiale de l'élément considéré au début de la période de 15 jours.

CONCLUSION

Nous avons vu que la teneur de la solution en chacun des éléments analysés peut soit diminuer, soit augmenter au cours du temps. Trois facteurs indépendants interviennent sur cette évolution :

- D'abord, le fait que les plantes absorbent de l'eau en plus ou moins grande quantité par rapport aux éléments minéraux qui sont fournis dans les solutions : selon que la plante absorbera plus d'eau ou plus d'éléments minéraux, on assistera à une concentration ou au contraire à une dilution des sels totaux de la solution.

- Ensuite, le fait que la plante soit douée d'une sélectivité d'absorption qui lui permet de choisir et d'utiliser certains ions en particulier, entraîne une diminution de la teneur de ces ions dans la solution par rapport aux autres ions.

- Enfin, le fait qu'un déséquilibre ionique ayant pour origine l'absorption sélective, entraîne une évolution chimique rapide de la solution et éventuellement la précipitation de certains ions.

C'est en associant ces 3 caractères que l'on peut essayer d'expliquer l'évolution des solutions au cours du temps.

Il apparaît donc qu'en vue de déterminer les facteurs de la transformation des solutions, nous devons analyser les caractères de l'absorption des ions par les plantes et ceux de l'évolution de la teneur des solutions en éléments nutritifs.

La présente discussion est nécessairement incomplète et ne concerne que certains points résultant d'un premier examen des chiffres obtenus, car les informations relatives à la teneur de la plante en éléments minéraux nous manquent ici, ainsi d'ailleurs que les résultats concernant l'évolution du pH qui seront donnés ultérieurement. Nous nous proposons, dans la discussion générale de comparer la quantité d'éléments nutritifs disparus des solutions et celle des éléments nutritifs contenus dans la plante. De cette comparaison nous pourrons déduire la quantité de chacun des éléments ayant précipité.

B - INTERPRETATION DES OBSERVATIONS CONCERNANT L'EVOLUTION DU PH DES SOLUTIONS NUTRITIVES EN COURS D'UTILISATION

Au moment où une solution vient d'être préparée, il est souvent nécessaire d'ajuster son pH au niveau voulu avec des acides ou des bases. Nous avons essayé de réaliser cet ajustement en perturbant le moins possible l'équilibre entre les ions ; c'est-à-dire que la solution de départ est toujours fixée de manière très précise. Nous nous proposons maintenant de suivre l'évolution du pH au cours du temps, en particulier en présence d'une plante capable d'une absorption sélective.

I - EVOLUTION DU PH EN L'ABSENCE DE LA PLANTE

Nous avons suivi l'évolution du pH de toutes les solutions nutritives pour évaluer l'influence de l'aération et du substrat, pendant 3 jours avant de mettre en place les boutures. Les méthodes utilisées sont précisées dans la figure 5.

Nous avons constaté que l'aération des solutions nutritives augmente le pH de 0,1 à 0,3 selon leur composition minérale. Pour confirmer cette constatation, nous avons fait des prélèvements de un litre de chaque solution fraîche et nous les avons aérés, en les agitant, pendant un jour. Nous avons remarqué que le pH se modifiait beaucoup plus lentement au cours de la deuxième tranche de 12 heures d'aération (figure 5 - a).

L'augmentation du pH avec l'aération se fait d'une manière différente selon la composition minérale des solutions nutritives. Les solutions 3 (phosphore) et 7 (HUGLIN) se remarquent par la stabilité de leur pH à l'aération.

Quand l'aération se fait en présence du substrat (figure 5 - b), on remarque globalement une évolution de même type que celle décrite ci-dessus : le pH augmente au cours de la première journée puis se stabilise peu à peu et n'évolue plus pendant la seconde journée.

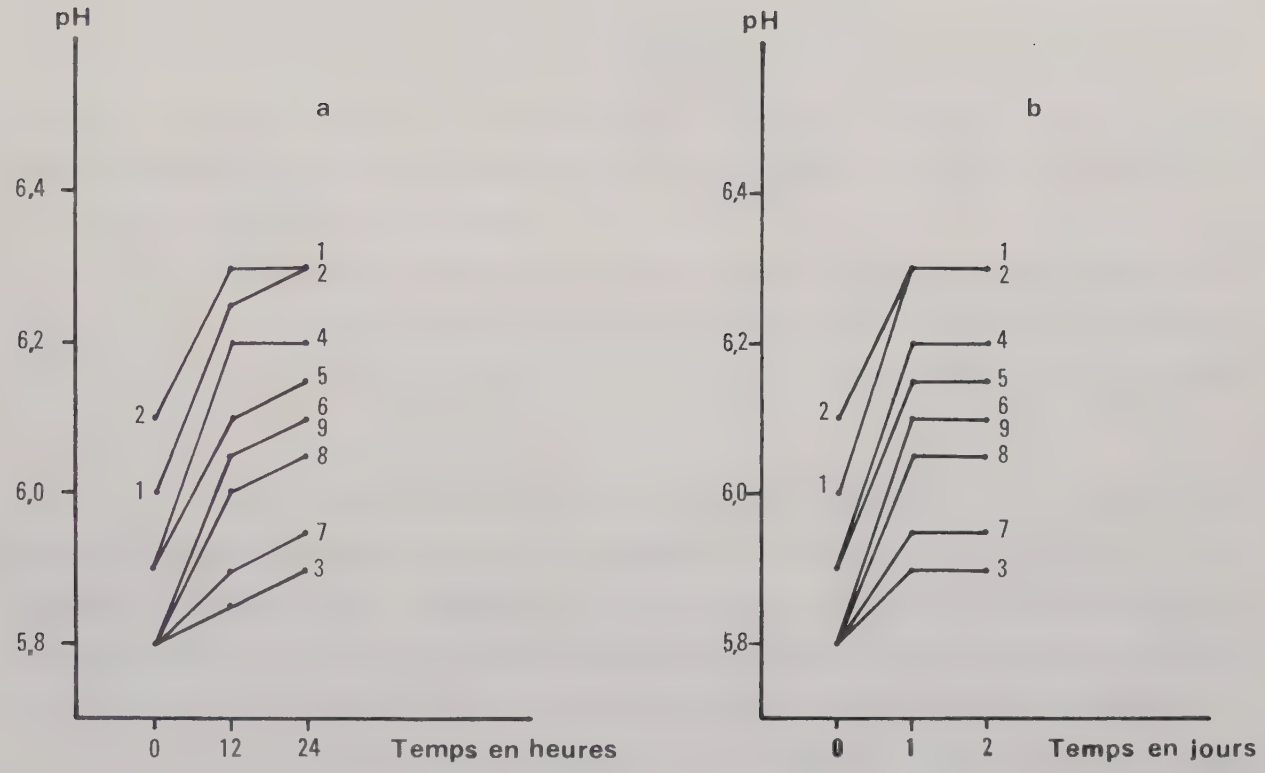


Figure **5** : évolution du pH des solutions nutritives

sous l'effet d'une aération crée artificiellement dans un récipient ouvert et agité

sous l'effet des conditions de cultures hydroponiques sans plante

II - EVOLUTION DU PH EN PRESENCE DE LA PLANTE

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 6. Ils concernent l'évolution du pH des solutions nutritives utilisées pendant 15 jours de culture. Les solutions sont habituellement changées tous les 7 jours ; exceptionnellement, et afin de mieux saisir leur évolution, nous les avons laissées pendant une période de 15 jours.

Les plantes prélèvent plus ou moins indépendamment l'eau et les ions minéraux. L'absorption sélective de certains ions amène des modifications de pH. Le pH est particulièrement sensible aux variations des ions OH^- et $H_2PO_4^-$.

Les résultats fournis par l'analyse des solutions nutritives (tableau 4) montrent que la teneur en phosphore diminue au cours de la culture dans les solutions 1 (azote), 2 (soufre), 5 (calcium), 8 (HOMES) et 9 (BECQUET). Cette diminution est probablement due à la formation de certains complexes insolubles du phosphore avec le calcium et le magnésium.

Après 24 heures d'utilisation des solutions nutritives, nous avons constaté une augmentation du pH de ces solutions qu'il nous semble possible d'imputer à la transformation de l'ion $H_2PO_4^-$ en HPO_4^{--}.

D'après les travaux de KOZMA et POLYAK (1964) et BLANC (1967), la présence d'une grande quantité d'azote pourrait entraîner l'augmentation de l'absorption de certains cations, en particulier des cations divalents. Cette sélectivité pourrait entraîner une augmentation du pH qui provoquerait en même temps la précipitation du phosphore.

La solution 2 (soufre) s'est comportée du point de vue de l'évolution de son pH à peu près de la même manière que la solution 1 (azote) que nous venons de décrire. Il semble que dans cette solution l'augmentation du pH soit due à une précipitation très abondante des phosphates.

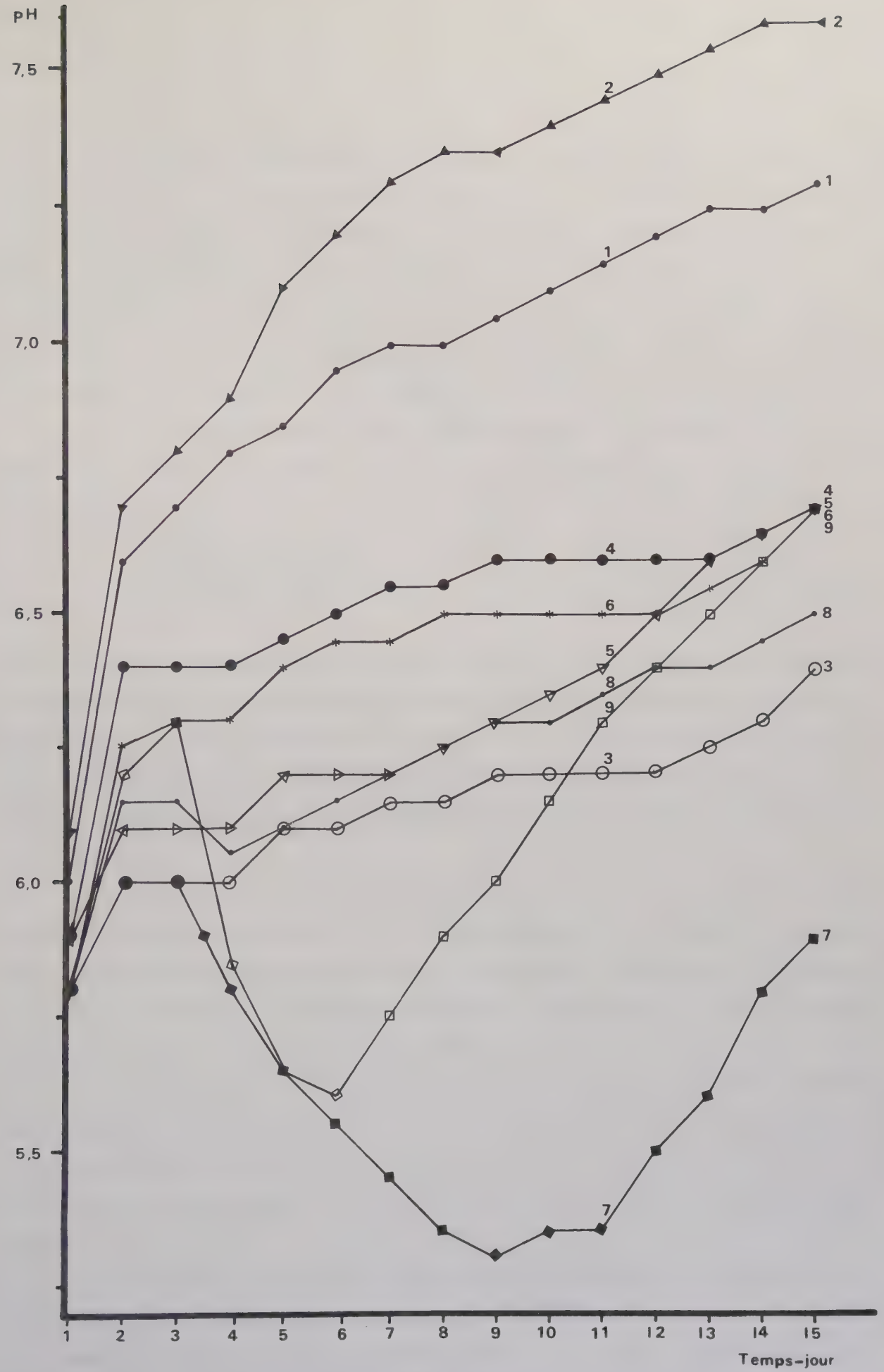


Figure **6** : évolution du pH des solutions nutritives dans une période de 15 jours.

Pour les solutions 3 (phosphore), 4 (potassium), 6 (magnésium), d'une part, et les solutions 5 (calcium), 8 (HOMES) d'autre part, nous avons constaté une augmentation lente et assez régulière du pH. Une telle augmentation pourrait s'expliquer soit par l'absorption sélective de certains ions minéraux, soit par la formation de précipités. La figure 4 montre que dans ce groupe, des précipitations sont intervenues seulement dans le cas des solutions 5 (calcium) et 8 (HOMES).

Les compositions ioniques des solutions 7 (HUGLIN) et 9 (BECQUET) sont très semblables (exprimées en meg/litre) :

	N	S	P	K	Ca	Mg
Solution 7 (HUGLIN) :	10,94	8,68	5,54	7,92	5,20	5,01
Solution 9 (BECQUET):	9,93	8,63	3,02	7,92	5,20	5,01

Dans l'ensemble, les évolutions de leurs pH sont très voisines. Ce sont en particulier les deux seules solutions pour lesquelles une baisse de pH a pu être constatée. Dans le détail, les évolutions sont légèrement différentes et le relèvement du pH s'amorce plus tôt pour la solution 9 (BECQUET) que pour la solution 7 (HUGLIN) ; la diminution du pH de celle-ci est d'ailleurs plus intense.

La figure 6 montre une diminution du pH de ces deux solutions nutritives à partir du troisième jour. Une telle diminution ne semble pas classique et la recherche bibliographique que nous avons pu faire nous a permis de trouver de nombreuses références d'étude de l'augmentation du pH mais pratiquement jamais d'étude de sa diminution.

Il faut peut-être remarquer que dans ces deux solutions seulement une partie de l'azote se trouve sous forme ammoniacale (122mg/litre de NH_4^+ pour la solution 7 (HUGLIN) et 133mg/litre pour la solution 9 (BECQUET)). L'absorption rapide et facile de ce cation pourrait entraîner une diminution du pH.

Quant'à la différence entre les deux solutions, on peut remarquer que la teneur en phosphore de la solution 7 (HUGLIN) est un peu plus élevée que celle de la solution 9 (BECQUET). Si l'on admet que le phosphore peut favoriser la pénétration de l'azote, on peut proposer dans ce sens une explica-

tion de la différence observée dans l'évolution du pH des deux solutions considérées.

CONCLUSION

Nous avons montré que les courbes d'évolution du pH des différentes solutions nutritives utilisées peuvent se répartir en trois groupes :

- le premier groupe correspond aux solutions dont la remontée du pH est très rapide et conduit, en moins d'une semaine, à des pH basiques avec tous les inconvénients que ce caractère présente.

- le deuxième groupe comprend des solutions dont la remontée de pH est constante mais faible, telle que la neutralité ne soit pas atteinte en 15 jours.

- le dernier groupe comprend les solutions dont l'évolution du pH est d'abord descendante, puis au bout d'une semaine environ, devient ascendante. Ceci indique une modification complexe de l'équilibre ionique de la solution. Du point de vue pratique, le pH de ces solutions reste toujours compris entre 6,0 et 5,5, pendant toute la première semaine où elles sont normalement utilisées.

Le pH étant fonction de la composition chimique de la solution nutritive, il est lié à sa formule. Les plantes prélevant certains ions dans cette solution, des modifications du pH en résultent qui conduisent :

- à répéter très souvent les mesures de pH qui peuvent éventuellement servir de test de l'évolution des solutions.

- à renouveler fréquemment les solutions en utilisant comme critère le test pH.

- à suivre de manière aussi précise que possible d'éventuelles précipitations du phosphore et du fer qui sont les deux éléments les plus sensibles au pH et à compléter périodiquement les solutions en ces deux éléments dans les cas où l'on désire ne pas les renouveler trop souvent.

Pour éliminer ce risque, nous avons complexé le fer dans toutes nos solutions.

C - INFLUENCE DES SOLUTIONS NUTRITIVES SUR LA CROISSANCE ET LE DEVELOPPEMENT DE LA VIGNE

I - ANALYSE DES CARACTERES DE LA CROISSANCE VEGETATIVE ET INFLORESCENTIELLE

1) CROISSANCE VEGETATIVE

Les résultats obtenus au cours de nos trois années d'expérimentation sont donnés dans les figures 7 à 9. Chaque courbe correspond à la moyenne de cinq plantes cultivées sur chacune des solutions.

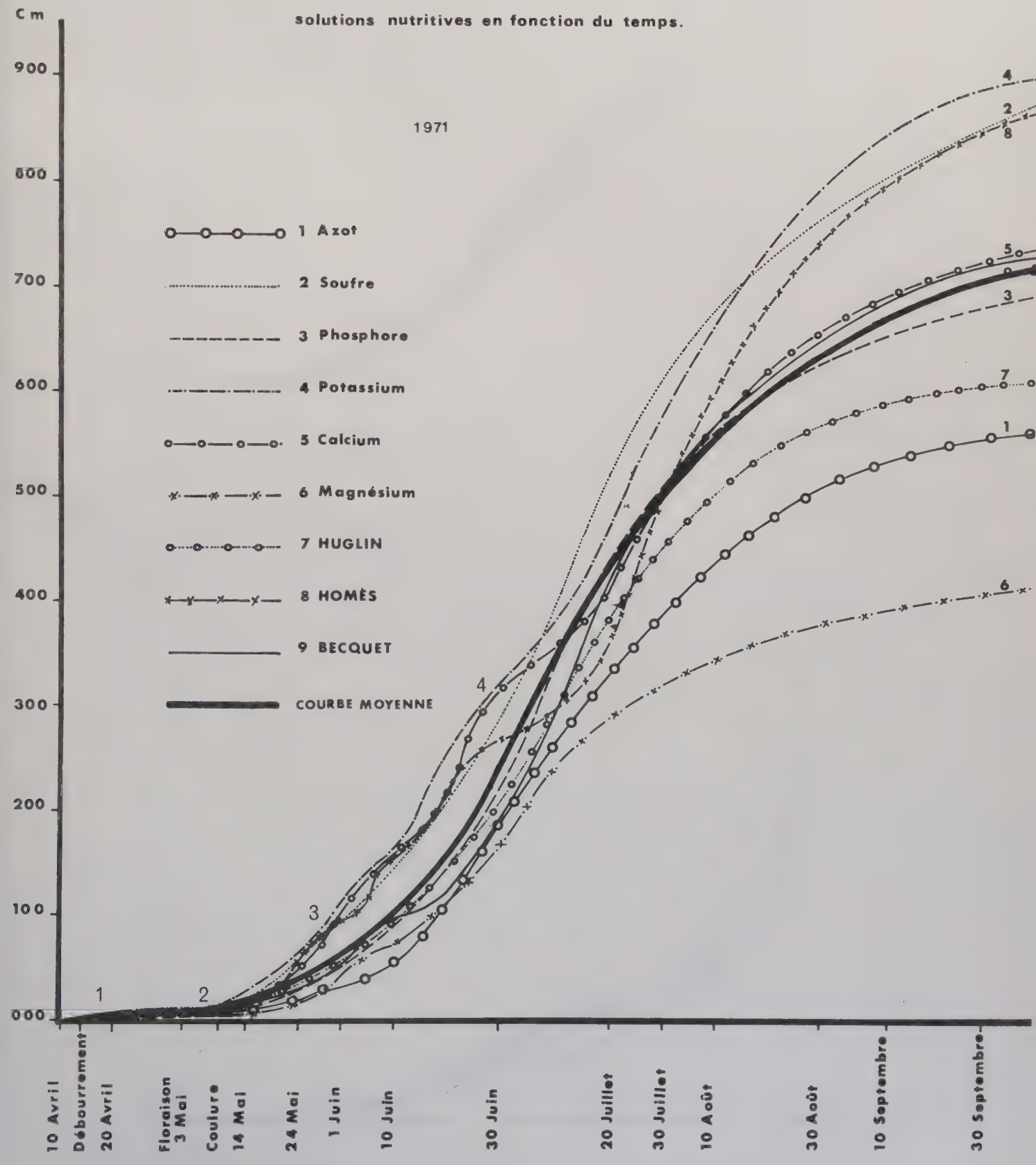
Nous nous proposons, dans un premier temps d'analyser les différences enregistrées au cours des années successives, puis de réaliser une analyse globale des résultats qui se dégagent de cette expérimentation.

Il apparaît que les résultats obtenus en 1971 et 1972 sont assez voisins, cependant la durée de l'expérience de 1971 étant plus longue, il en ressort une différence d'aspect des courbes qui ne résiste pas à l'analyse ; en effet le 8 août, date de fin des expériences de 1972, les rameaux avaient atteint une longueur comprise entre 350 et 500cm ; ces longueurs se trouvent dans la fourchette établie en 1971 pour les différentes solutions. Il faut rappeler ici qu'en 1972, ayant décidé de se référer à la quantité de matière sèche synthétisée, nous n'avons pas enlevé les entrecoeurs à mesure de leur apparition, comme nous l'avions pratiqué en 1971.

En 1973, les courbes de croissance sont très nettement différentes de celles obtenues au cours des deux années précédentes ; elles ne correspondent pas non plus aux résultats obtenus par d'autres chercheurs dans les mêmes conditions (BECQUET, VITALE, KEITA). C'est pourquoi le protocole expérimental concernant les analyses de matière végétale prévu pour cette année a été en grande partie abandonné. La cause du démarrage très tardif de la croissance n'a pas été trouvée avec certitude, elle pourrait être due à des émanations accidentelles de gaz toxiques.

Les résultats qui se dégagent de ces courbes et qui confirment les précédents travaux dans ce domaine sont les suivants :

Figure 7 : Croissance moyenne des rameaux dans des solutions nutritives en fonction du temps.



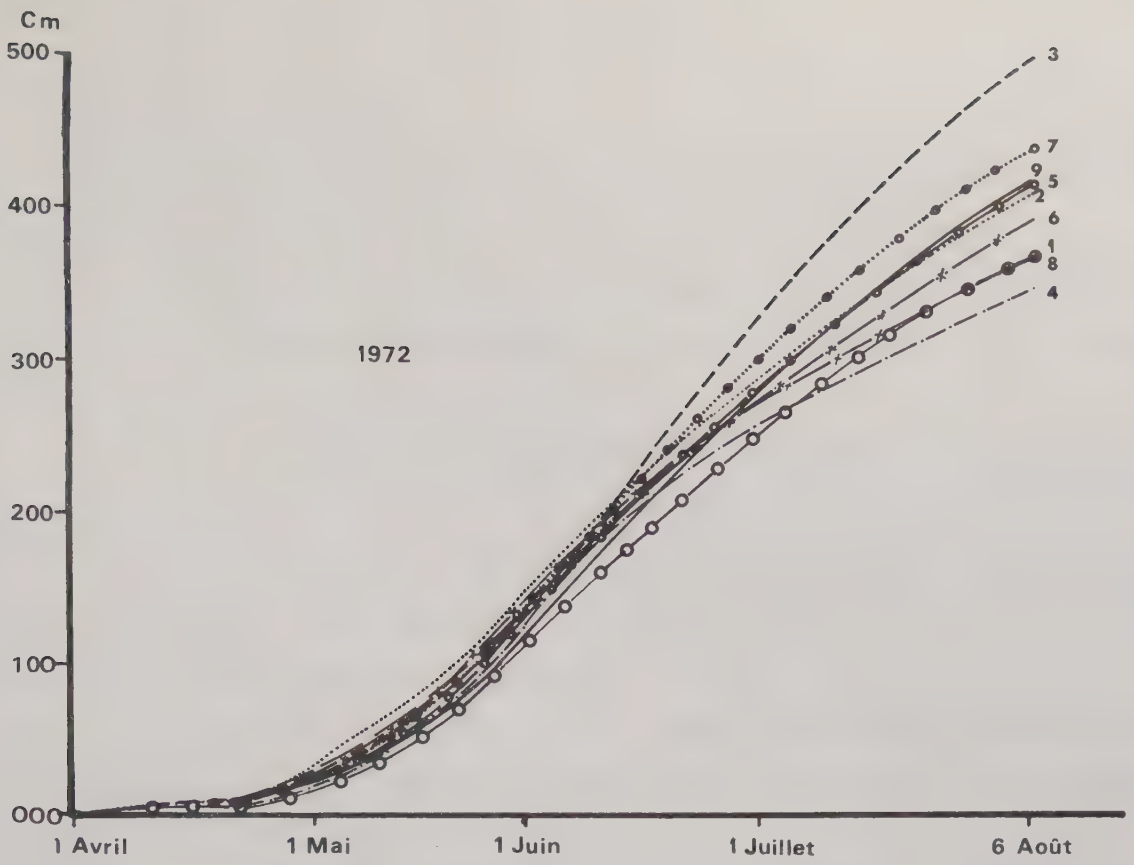


Figure **8** : croissance moyenne des rameaux en fonction du temps - 1972

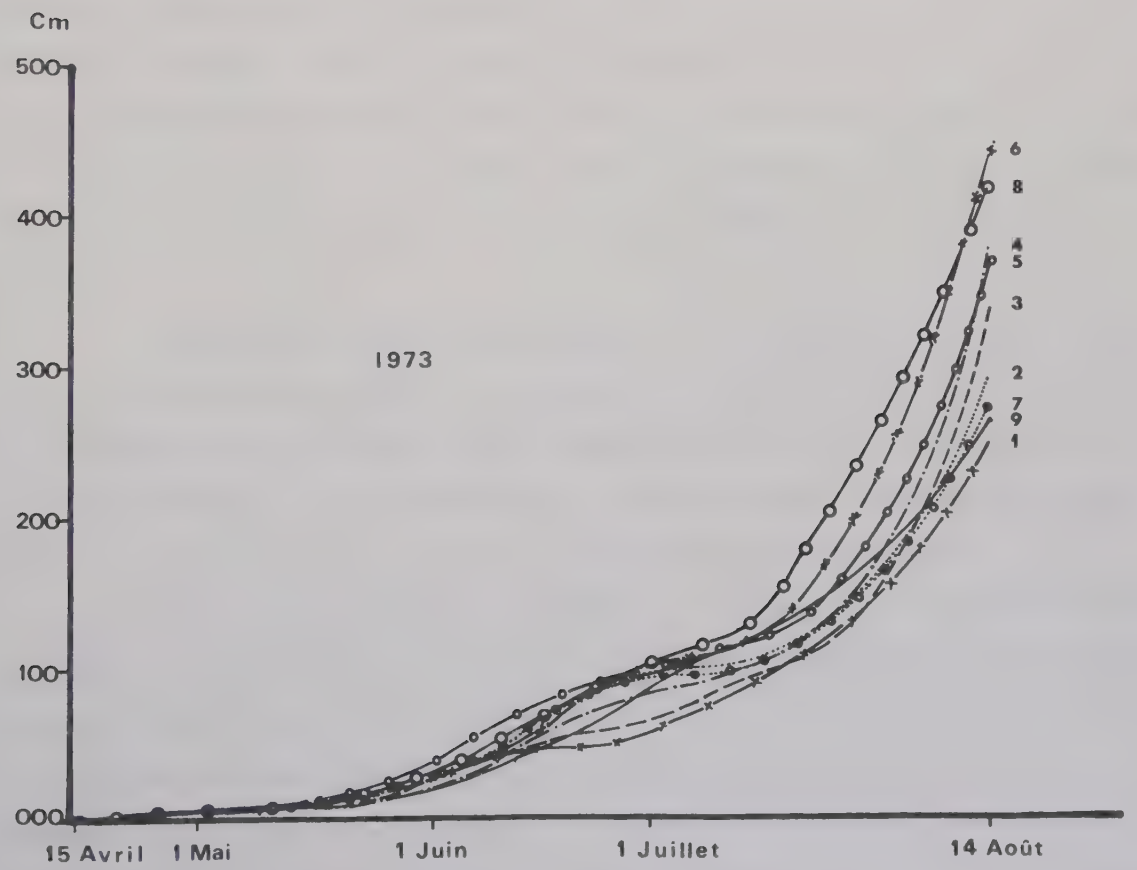


Figure **9** : croissance moyenne du rameau en fonction du temps - 1973

D'une manière générale les courbes dont l'origine se situe au moment du débourrement peuvent être divisées en 4 phases (figure 7) :

- La première phase est constituée par une période de croissance assez lente, elle conduit à l'obtention de pousses de 15cm à 20cm de long et dure une vingtaine de jours.

- La deuxième phase correspond à un arrêt de croissance qui dure lui aussi environ 20 jours.

- Quarante jours environ après le débourrement, la phase 3 commence, c'est-à-dire que l'on assiste à un redémarrage de la croissance qui va s'accélérer progressivement pendant un mois.

- Au cours de la phase 4 la vitesse de croissance est maximum ; dans la plupart des cas, elle est de l'ordre de 7cm par jour, mais nous avons pu obtenir des croissances de 11cm/jour.

Les pousses obtenues à partir de nos boutures à un oeil ont atteint 6, voire 8 mètres de longueur après 4 mois 1/2 de culture (2 mois 1/2 seulement à vitesse maximum). Il est possible de remarquer, dans la plupart des cas, que le diamètre des pousses est nettement plus réduit dans la phase 1, formée à un moment où la vitesse de croissance est faible, que dans la phase 4 ; cette différence demeure , elle conduit à l'obtention de pousses plus grêles à leur base que dans leur partie médiane et laisse à penser que certains caractères du cambium sont fixés de manière définitive au moment de son initiation.

L'interprétation physiologique de ce phénomène tient dans le fait que de la même manière que la croissance en longueur des entrenoeuds se réalise en une dizaine de jours leur croissance en diamètre s'arrête au bout de 3 semaines environ (Mme MERIAUX ; communication orale) et qu'elle se reprend que l'année suivante lors de la réactivation du cambium.

On peut admettre que la phase 1 correspond à la croissance obtenue grâce aux réserves de la bouture, la phase 2 correspond à un arrêt de croissance déterminé par l'épuisement de ces réserves, au cours de la phase 3 des racines qui ont commencé à apparaître durant la phase 2, deviennent suffisamment fonctionnelles pour que la croissance reprenne, c'est-à-dire qu'à partir de cette phase la croissance n'est plus assurée par les réserves mais

par la solution nutritive ; enfin dans la phase 4, la plante est établie et elle a une vitesse de croissance maximum qui dépend de la solution minérale fournie.

2) CROISSANCE INFLORESCENTIELLE ET FLORALE

Tout se passe comme si les boutures étaient cultivées sur de l'eau. Il semble même, mais ces résultats ne sont pas statistiquement significatifs, que la présence d'une solution nutritive, soit un peu moins favorable que l'eau pure à la croissance des inflorescences et à la transformation des fleurs en fruits. La croissance des inflorescences se produit donc de manière très partielle ; pendant le premier mois de culture, de nombreuses inflorescences avortent c'est-à-dire qu'elles jaunissent et qu'elles tombent ; quand quelques boutons floraux continuent leur croissance jusqu'à la floraison , celle-ci se produit environ un mois après le débourrement à un moment où la croissance est à peu près arrêtée. Il apparaît donc que le maintien des boutures sur une solution nutritive dont nous savons qu'elle est très favorable à une croissance active, n'a pas permis d'améliorer l'évolution des grappes contenues dans les bourgeons des boutures (BESSIS et ECEVIT, 1974).

La floraison se produit à un moment où la croissance des pousses est pratiquement arrêtée, parce que la presque totalité des réserves de la bouture a été utilisée. Des observations nous ont montré que les racines sont encore peu développées et pratiquement pas ramifiées, c'est-à-dire qu'elles sont peu ou pas fonctionnelles du point de vue de l'absorption.

II - QUANTITE DE MATIERE SECHE SYNTHETISEE ET CARACTERES DE L'AOUTEMENT

Les tableaux 6 et 7 et les figures 10 à 12 résument les résultats concernant la teneur en matière sèche des différentes parties de la plante et fournissent des mesures concernant les caractères de l'aoûtement.

Il apparaît que la solution 1 (azote) a permis d'obtenir la plus grande quantité de matière sèche (tableau 7), bien que pour la matière fraîche, elle vienne après les solutions 5 (calcium), 7 (HUGLIN) et 2 (sou-

fre) (tableau 6). Il faut noter ici l'importance des synthèses qui ont été réalisées en 4 mois 1/2 de culture puisque en partant de moins de 50g de bouture, nous arrivons à plus de 1000g de matière fraîche totale. Cette constatation permet de montrer la valeur des analyses végétales qui ont été réalisées et confirme le fait que l'apport dû à la bouture est très minime par rapport au prélèvement des plantes dans les solutions nutritives.

Le début de l'aoûtement s'est manifesté au bout de trois mois de culture et à quelques jours près, il a été synchrone pour toutes les solutions ; des différences se sont assez rapidement marquées, relativement à la vitesse d'avancement de l'aoûtement le long du rameau.

Le tableau 6 montre que, pour les différentes solutions nutritives, il n'y a pas toujours un parallélisme étroit entre la quantité de matière fraîche formée et la quantité de matière sèche. Ceci s'explique dès que l'on a constaté que certaines solutions favorisent l'aoûtement des pousses, alors que d'autres solutions ralentissent ce processus. En effet, la teneur en matière sèche des sarments aoûtés est de l'ordre de 30%, alors que la teneur en matière sèche des parties non aoûtées est voisine de 15%. Le tableau 6 montre pour la solution 1 (azote) une exception intéressante à propos de la teneur en matière sèche des rameaux non aoûtés qui est de 28,3%. Ceci s'explique en remarquant que la solution 1 (azote) semble très favorable à l'aoûtement, puisque dans la partie aoûtée, on trouve une teneur en matière sèche très élevée et que corrélativement même les parties non aoûtées sont en voie d'aoûtement très rapide et qu'elles contiennent déjà une teneur en matière sèche qui se rencontre pour d'autres solutions dans les parties aoûtées. Ces constatations nous mènent à la notion de qualité de l'aoûtement. Indépendamment des caractères analytiques, l'observation visuelle peut, dans certains cas, faire la différence entre un aoûtement de bonne qualité qui s'est poursuivi normalement jusqu'à son terme et un aoûtement de mauvaise qualité (ou qui vient de commencer), qui laisse par exemple des plages vertes à l'intérieur du rameau aoûté. Les solutions 4 (potassium) et 5 (calcium) se marquent non seulement par un poids de rameau aoûté assez faible, mais aussi par une très mauvaise qualité de l'aoûtement. C'est-à-dire que des plantes de même âge chronologique peuvent avoir des âges physiologiques différents si l'on consi-

solutions	matière fraîche totale (en g)	feuilles		sarments non aoûtés		sarments aoûtés		pourcentage d'aoûtement	racines	
		poids total frais (en g)	teneur en matière sèche (en % de M.F.)	poids total frais (en g)	teneur en matière sèche (en % de M.F.)	poids total frais (en g)	teneur en matière sèche (en % de M.F.)		poids total frais (en g)	teneur en matière sèche (en % de M.F.)
1 - azote	1130	624	18,9	213	28,3	160	37,5	42,9	133	12,0
2 - soufre	1265	652	15,0	411	15,4	134	32,5	24,6	68	9,5
3 - phosphore	1050	458	15,2	470	16,0	68	31,3	12,6	54	7,7
4 - potassium	667	318	13,4	277	13,7	42	28,2	13,2	30	8,1
5 - calcium	1391	713	14,4	511	16,4	95	27,6	15,7	72	8,1
6 - magnésium	602	330	14,8	174	15,4	71	32,8	29,0	27	11,1
7 - HUGLIN	1327	657	13,9	511	13,2	95	28,7	15,7	64	6,6
8 - HOMES	975	450	14,8	344	14,5	151	28,9	30,5	30	9,2
9 - BECQUET	1039	590	17,5	285	17,9	54	35,5	15,9	110	9,2

Tableau 6 : matière végétale formée en fonction des solutions nutritives (1972).

solutions nutritives	parties végétales				
	feuilles	rameaux verts	rameaux aoûtés	racines	TOTAL
1 - Azote	117,71	60,33	59,95	15,92	253,91
2 - Soufre	98,00	63,29	43,55	6,40	211,24
3 - Phosphore	69,60	75,20	21,20	4,15	170,24
4 - Potassium	42,45	37,95	12,00	2,40	94,80
5 - Calcium	102,67	83,80	26,22	5,81	218,50
6 - Magnésium	48,84	26,80	23,28	3,00	101,92
7 - HUGLIN	91,27	67,45	27,29	4,25	190,26
8 - HOMES	66,60	49,88	43,62	2,70	162,80
9 - BECQUET	103,25	51,16	19,17	10,12	183,70

Tableau 7 : poids total sec des parties végétales formées en rapport avec les différentes solutions nutritives fournies (exprimé en gramme).

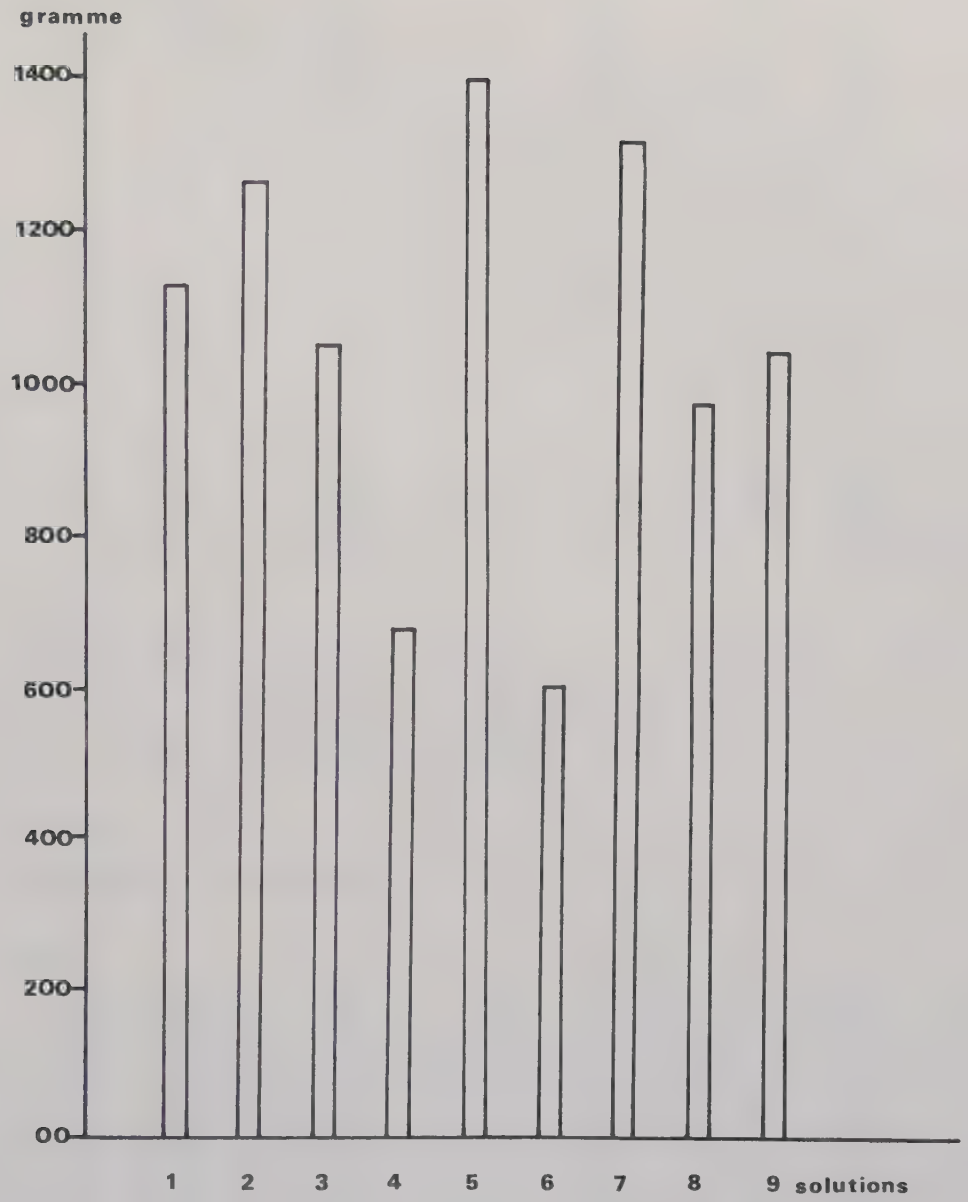


Figure 10 : Matière végétale fraîche synthétisée en fonction des solutions nutritives (1972).

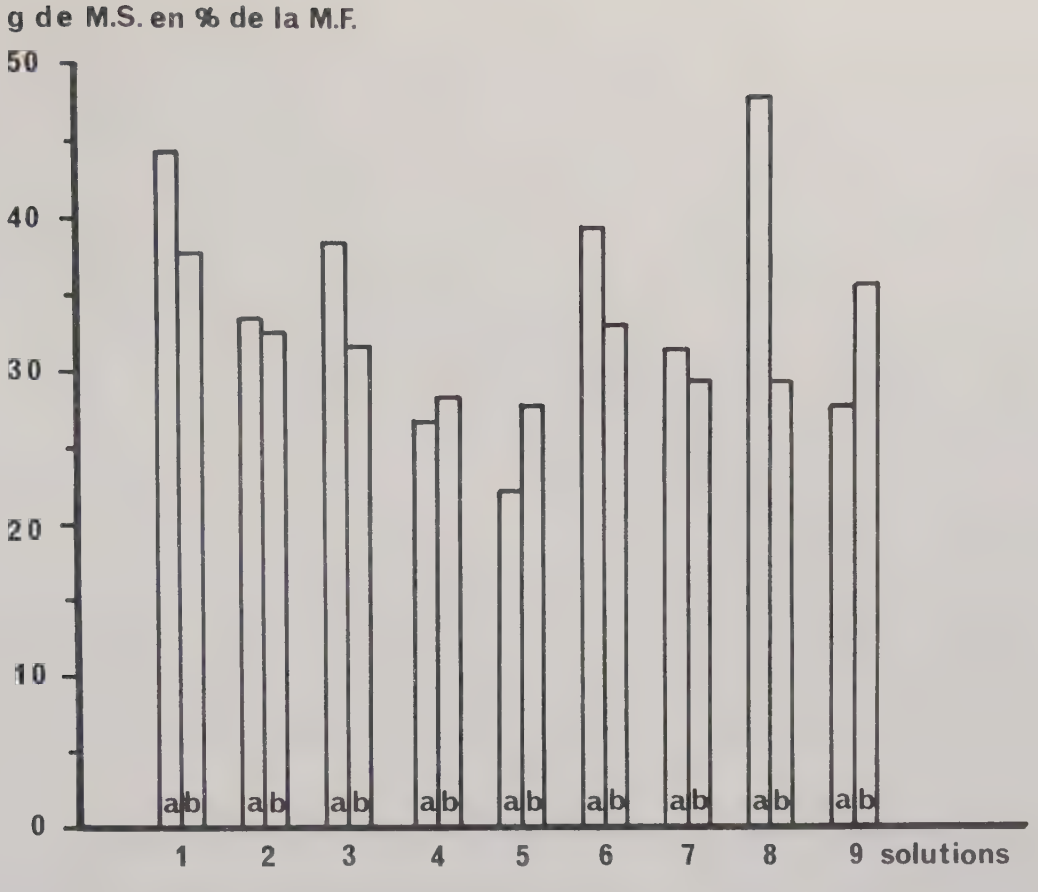


Figure **11**: teneur en matière sèche des sarments aoûtés
(g pour 100 g de matière fraîche)
a) sarments aoûtés 1971
b) sarments aoûtés 1972

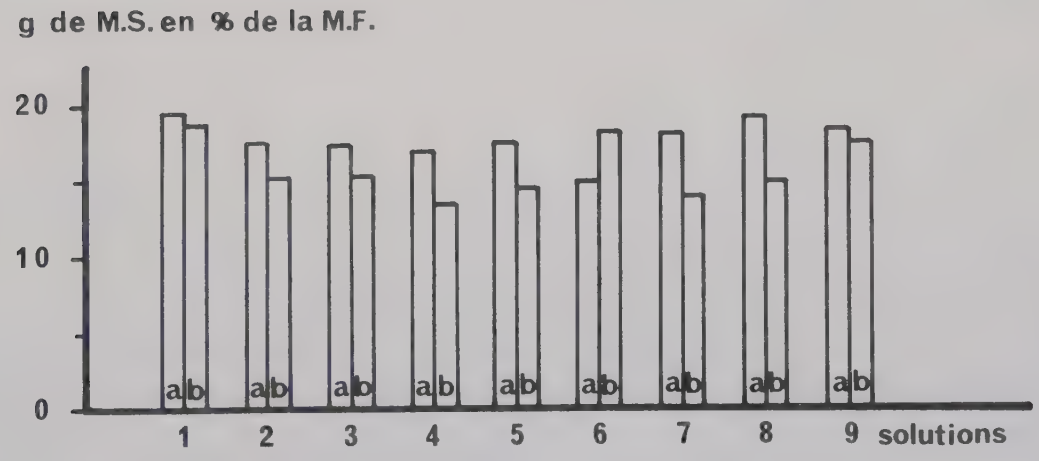


Figure **12** : teneur en matière sèche des feuilles
(g pour 100 g de matière fraîche)
a) feuilles 1971
b) feuilles 1972

dère l'évolution de leurs tissus et l'accumulation des matières de réserve.

L'aoûtement est donc défini ici de manière assez subjective, mais nos observations montrent que dans toutes nos cultures, il n'existe pas de parallélisme étroit entre l'aoûtement et un caractère non moins subjectif la vigueur ; pour certaines solutions, la vigueur était grande : les rameaux étaient longs et avaient un fort diamètre (tableau 8) alors que l'aoûtement était mauvais ; par exemple, la solution 7 (HUGLIN) a fourni des rameaux presque deux fois plus longs mais moins bien aoûtés que ceux de la solution 9 (BECQUET).

Les valeurs de la teneur en matière sèche que nous avons obtenues sont du même ordre de grandeur que celles fournies par BOUARD (1966) dans les conditions naturelles où il note une teneur en matière sèche qui passe de 30% environ au début de l'aoûtement à presque 50% vers la fin de celui-ci.

Pour saisir plus facilement les caractères des différentes solutions nutritives vis-à-vis de l'aoûtement, nous avons fait figurer dans le tableau 6 le "pourcentage d'aoûtement" défini comme le rapport du poids frais de rameau aoûté sur le poids frais de l'ensemble des rameaux fournis par une solution. Il apparaît que pour certaines solutions (3 (phosphore), 5 (calcium), 4 (potassium), 7 (HUGLIN) et 9 (BECQUET)), ce pourcentage est inférieur à 20% alors que pour la solution 1 (azote) il tend vers 43%.

CONCLUSION

Les caractères de la synthése de matière sèche et de l'aoûtement sont donc très fortement différents d'une solution à l'autre. Etant donné la variabilité de composition des solutions au cours de l'expérience, il nous paraît impossible d'affirmer que les caractères de la croissance ou de l'aoûtement sont dûs à la dominance de tel ou tel élément dans la solution. La troisième partie de notre travail concernant l'analyse végétale nous apportera d'autres informations dans ce domaine.

solutions nutritives	nombre de plantes	diamètre des rameaux (en mm)		
		premier entre-nœud bien dégagé	entre-nœud au milieu du rameau	diamètre moyen
1 - Azote	5	5,5	4,7	5,1
2 - Soufre	5	6,2	6,3	6,25
3 - Phosphore	5	5,1	4,8	4,95
4 - Potassium	5	6,5	8,2	7,35
5 - Calcium	5	6,0	6,8	6,4
6 - Magnésium	5	5,8	4,1	4,95
7 - HUGLIN	5	5,7	5,8	5,75
8 - HOMES	5	5,7	4,2	4,95
9 - BECQUET	5	5,8	6,6	6,2

Tableau 8 : effet des solutions nutritives sur le diamètre des rameaux (1971).

D - DISCUSSION DE QUELQUES CARACTERES ASSOCIES AUX RELATIONS ENTRE LA CROISSANCE ET LA SOLUTION NUTRITIVE

I - ESSAI DE DESCRIPTION ET D'INTERPRETATION DES SYMPTOMES VISIBLES DE CARENCE OU DE TOXICITE

L'absence des fonctions régulatrices du sol fait ressortir plus facilement certains symptômes de carence ou de toxicité.

On peut imaginer plusieurs types de causes à l'apparition de ces symptômes :

- carence ou toxicité directe d'un élément. Ces symptômes qui ont été abondamment décrits par les précédents auteurs devraient être facilement reconnus.

- carences ou toxicités faisant intervenir plusieurs éléments produisant des manifestations complexes difficiles à interpréter.

- interactions alimentaires. Même si l'on arrive à reconnaître le symptôme, celui-ci ne permet pas toujours de définir l'interaction qui se trouve à son origine.

De plus, chaque élément nutritif déclenche des symptômes de carence ou de toxicité qui dépendent de l'état physiologique de la plante et des conditions de milieu où elle se trouve. Dans des conditions habituelles, on peut reconnaître leur origine assez facilement, mais lorsque ces facteurs changent, les symptômes deviennent la plupart du temps impossible à interpréter.

Description et interprétation de symptômes visuels :

Deux remarques sont à faire au préalable. La première tient au fait que au cours de notre expérimentation sur toutes nos solutions, nous avons observé assez rarement des symptômes visibles de carence ou de toxicité ; ceci nous permet de décrire avec une certaine précision les quelques cas rencontrés. La deuxième tient au fait que, bien que travaillant sur un cépage rouge, qui a tendance à rougir assez facilement dans la nature, nous n'avons que très exceptionnellement rencontré de tendance au rougissement, la manifestation la plus fréquente étant le jaunissement. Les conditions de

ILIEU
6

notre culture, sans refroidissement pendant la nuit sont peut-être à l'origine de ce comportement.

Au cours de la troisième année d'expérimentation, nous avons constaté des symptômes de "carence" identiques sur toutes nos plantes ; pendant que ces symptômes se manifestaient, la croissance était très lente (voir figure 9). Des émanations de solvants semblent en être la cause et nous obligent à rejeter pratiquement tous les résultats obtenus lors de cette expérience.

En 1971 toutes les plantes cultivées sur la solution 6 (magnésium) bien que présentant un aspect vigoureux et une croissance rapide (entre-noeuds longs) avaient une couleur vert-clair et un retard de lignification se manifestant par une tendance à se casser facilement. Les feuilles portées par ces rameaux sont petites avec des dents très pointues et dirigées vers le bas ; leur couleur est peu soutenue avec un jaunissement internervaire assez diffus. Ces symptômes apparaissent sur les jeunes feuilles et demeurent au cours de la croissance de celles-ci.

Il nous semble que nous pourrions rapprocher ces manifestations de celles de la carence calcique. Cependant la carence en calcium détermine un arrêt de la croissance que nous ne notons pas ici, mais aussi plusieurs des symptômes rencontrés : pousses fragiles, enroulement des feuilles, chlorose internervaire.

En 1972, après un mois et demi de culture sur la solution 3 (phosphore) sont apparus les symptômes suivants sur les jeunes feuilles : jaunissement de 1 à 2 cm de largeur tout autour de la feuille. Ces symptômes demeurent pendant toute la durée de la culture et ils n'intéressent pas les feuilles âgées.

Ces signes pourraient nous faire penser à une carence potassique, mais nous sommes surpris :

1) par la précocité de leur apparition
2) par le fait qu'ils ne concernent pas les feuilles âgées et adultes
3) par la coloration jaune et non pas rouge, laquelle est caractéristique de la carence en potassium (brunissure) chez le Pinot.

Au cours de la même année, les vignes cultivées sur la solution 9 (BECQUET) ont montré, après deux mois de culture, les symptômes suivants : un jaunissement internervaire laissant une bande verte assez étroite de part et d'autre des nervures principales et secondaires. Ces symptômes font penser à la carence magnésienne avec toujours la même remarque concernant l'apparition d'un jaunissement alors que l'on attendrait un rougissement.

En conclusion il nous paraît possible d'insister sur le fait que les solutions nutritives utilisées bien que destinées à provoquer des symptômes de carence ou d'excès bien déterminés n'ont pas produit les manifestations typiques attendues. Le végétal joue le rôle d'une barrière parfaitement sélective et ce n'est pas parce qu'une solution contient une forte teneur en l'un ou l'autre des éléments minéraux que cet élément se retrouvera en quantité importante dans les tissus vivants.

II - ESSAI D'EVALUATION DU COEFFICIENT DE TRANSPIRATION

Notre étude nous a conduit à connaître d'une part la quantité de matière sèche totale synthétisée par des plantes dont nous avions établi la courbe de croissance et d'autre part la consommation d'eau pendant une période déterminée.

Il nous a été possible de déterminer l'évaporation de cinq bacs de culture maintenus dans des conditions identiques aux bacs expérimentaux mais ne contenant pas de plante ; la quantité d'eau évaporée dans ces conditions est de 6,6 litres pour 15 jours ; par différence il devient facile de connaître la quantité d'eau transpirée.

A partir des courbes de croissance, nous pouvions calculer l'allongement des plantes pendant la période où leur consommation d'eau avait été mesurée (figure 8). Par le calcul et en admettant que l'allongement ait été proportionnel à l'augmentation de la matière sèche, ce qui n'est que très approximatif, nous avons déterminé la quantité de matière sèche formée pendant cette période.

Le tableau 9 qui indique les différentes valeurs utilisées pour ce

solutions	ET en 15 jours (mésurée) en litre	eau transpirée en 15 j. en l. (mésurée)	total de M. S. formée (en gramme, mésuré)	croissance totale (en cm, mésurée)	croissance en 15 jours (en cm, déterminée)	M. S. formée en 15 jours (en g, calculée	coefficient de transpiration (calculé)
1 - Azote	29	22,4	254	371	55,7	38,1	588
2 - Soufre	31	24,4	211	409	61,4	31,7	771
3 - Phosphore	28	21,4	170	500	75,0	25,5	839
4 - Potassium	28	21,4	95	349	52,4	14,3	1496
5 - Calcium	29	22,4	219	417	62,6	32,9	681
6 - Magnésium	25	18,4	102	394	59,1	15,3	1203
7 - HUGLIN	34	27,4	190	440	66,0	28,5	961
8 - HOMES	28	21,4	163	371	55,7	24,5	873
9 - BECQUET	28	21,4	184	421	63,2	27,6	775

Tableau 9 : calcul du coefficient de transpiration d'après les mésures éffectuées pendant la période de 15 jours (du 10 - 7 - 1972 au 24 - 7 - 1972) et pour une croissance totale active de 100 jours.

calcul, fournit dans la dernière colonne une évaluation du coefficient de transpiration. Il apparaît qu'il se situe le plus souvent entre 588 et 1200 c'est-à-dire que sa valeur est assez élevée.

Ce niveau élevé du coefficient de transpiration est à attribuer en partie au fait que notre période de mesure se situe à un moment où la croissance de la vigne se ralentit : notre système d'évaluation nous conduit à sous-estimer la quantité de matière sèche synthétisée pendant cette période où il n'y a plus du tout proportionnalité entre croissance et synthèse.

CONCLUSION

Notre étude concernant l'effet des solutions nutritives sur la croissance et le développement de la vigne nous a permis :

- d'analyser les premières phases de la croissance de pousses portées par des boutures et de montrer de manière précise à partir de quel moment la solution nutritive devenait efficace.
- de constater que la croissance inflorescentielle et florale se produisant presque entièrement sur les réserves de la bouture, était fortement perturbée et ne pouvait conduire de manière régulière à l'obtention de fruits.
- de montrer que selon les solutions nutritives, on obtenait des quantités de matière sèche très différentes et que les caractères de l'aoûtement étaient eux aussi fortement différents.
- de décrire des symptômes visiblesde nutrition défectueuse en essayant de les rapprocher des connaissances classiques dans ce domaine.
- enfin, de déterminer le coefficient de transpiration de nos plantes pendant une période définie.

E - EFFET DES SOLUTIONS NUTRITIVES SUR LA COMPOSITION MINERALE DE LA VIGNE

Nous nous proposons dans ce chapitre d'indiquer les résultats obtenus pour chacune des solutions minérales ; en opérant de cette manière la discussion des résultats est nécessairement écourtée, car il est à peu près impossible d'établir des comparaisons entre les solutions nutritives. Seule la comparaison avec les teneurs classiquement admises peut être effectuée.

Nous indiquerons d'autre part les valeurs de 4 rapports classiques entre éléments principaux, ils pourraient permettre d'établir la présence d' interaction ou tout au moins fournir un point de comparaison avec les données obtenues par d'autres auteurs.

Après avoir fourni les résultats numériques indiqués ci-dessus et les avoir replacés dans le contexte habituel nous essairons de proposer des comparaisons entre les solutions ; ces comparaisons seront rendues plus faciles grâce d'une part aux tableaux 28 à 31 qui regroupent l'ensemble des résultats numériques et d'autre part aux figures 14, 19 qui étudient pour un élément donné la variation de sa teneur à la fois dans la plante pour deux années expérimentales et dans la solution nutritive en fonction de la composition des solutions mises à la disposition de la plante.

I - RESULTATS ANALYTIQUES ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS HABITUELLES.

1) COMPOSITION MINERALE DE LA FEUILLE (tableau 28)

a) EFFET DE LA SOLUTION 1-AZOTE

La composition minérale des feuilles obtenues sur cette solution nutritive dont nous avons donné la composition dans le chapitre réservé aux méthodes est restée au niveau des valeurs acceptées comme normales (tableau 10).

Les tableaux suivants résument les résultats concernant la composition minérale des feuilles et de la solution 1-Azote.

	teneurs en éléments minéraux (g. en % de la M.S.)					
	N	S	P	K	Ca	Mg
valeurs limites(*)	1,75-3,2	0,18-0,74	0,12-0,25	0,15-3,85	1,7-3,76	0,12-0,63
évolution en fonction de l'âge(*)	diminution importante		diminution	diminution	augmentation importante	augmentation
nos résultats (**)	3,15	0,23	0,23	1,38	1,98	0,29

tableau 10 : composition minérale des feuilles des plantes de la solution 1-Azote.

rapports	N/P	K/P	K/Mg	Ca/Mg
valeurs habituelles (diagnostic foliaire, alimentation normale)	9-12	4-6	4-6	8-15
rapport dans les feuilles	13,6	6	4,7	6,8
rapport dans la solution	4	5,3	3,4	1,7

tableau 11 : rapports des éléments minéraux dans les feuilles et dans la solution 1-Azote.

L'examen des tableaux ci-dessus fait ressortir les effets suivants: une solution nutritive fortement azotée donne une forte teneur en azote mais qui reste dans les limites classiquement admises. Elle n'a pas beaucoup d'influence sur la composition minérale de la plante. Les rapports des éléments minéraux ont des valeurs voisines de celles des rapports habituels (tableau 11) et ils ne sont pas toujours dans les mêmes rapports que les éléments mi-

---

(*): Les valeurs limites et l'évolution des éléments minéraux dans les feuilles en fonction de l'âge ne seront plus mentionnées dans les tableaux suivants.

(**): Ces chiffres sont des résultats analytiques de l'année 1972. Les résultats de l'année 1971 ont été fournis dans un précédent travail (ECEVIT, 1972) ; nous les avons partiellement repris plus loin pour établir des comparaisons.

néraux de la solution nutritive. Ceci revient à dire que certains éléments minéraux se diluent ou se concentrent dans la solution par rapport aux autres à mesure que la plante réalise ses prélèvements.

b) EFFET DE LA SOLUTION 2-SOUFRE

Cette solution nutritive n'a pas eu non plus un effet significatif sur la composition minérale des feuilles. La teneur en tous les éléments minéraux reste dans la fourchette habituellement admise (tableau 12).

Comme la solution précédente les rapports des éléments minéraux dans les feuilles sont très proches des rapports habituels, mais ils sont loins de suivre les rapports de la solution nutritive (tableau 13).

	teneur en éléments minéraux (g. en % de la M.S.)					
éléments minéraux	N	S	P	K	Ca	Mg
nos résultats	3,04	0,24	0,24	1,44	1,98	0,33

tableau 12 : composition minérale des feuilles des plantes cultivées sur la solution 2-Soufre.

rapports	N/P	K/P	K/Mg	Ca/Mg
rapports dans les feuilles	12,6	6,0	4,7	6,1
rapports dans la solution	1,4	5,3	3,4	1,7

tableau 13 : rapports des éléments minéraux dans les feuilles et dans la solution 2-Soufre.

c) EFFET DE LA SOLUTION 3-PHOSPHORE

Cette solution nutritive caractérisée par sa teneur élevée en phosphore conduit à une augmentation de la teneur des feuilles en azote et en phosphore ; la concentration de ces deux éléments dépasse alors les teneurs maxi-

males admises. La teneur en calcium au contraire descend au dessous de la limite minimale (tableau 14).

Les rapports des éléments minéraux dans les feuilles semblent n' avoir là encore aucune relation avec les rapports de ces mêmes éléments dans la solution nutritive (tableau 5) ; ils peuvent être considérés comme normaux sauf pour le rapport Ca/Mg qui est très bas à cause de la faible teneur en calcium. Une interprétation du niveau de ce rapport basée sur les caractères de l'aoûtement sera fournie plus loin.

	teneur en éléments minéraux (g. en % de la M.S.)					
éléments minéraux	N	S	P	K	Ca	Mg
nos résultats	3,97	0,21	0,36	1,38	1,29	0,32

tableau 14 : composition minérale des feuilles des plantes cultivées sur la solution 3-Phosphore.

rapports	N/P	K/P	K/Mg	Ca/Mg
rapports dans les feuilles	11,2	3,9	4,4	4,1
rapports dans la solution	0,5	1,8	3,4	1,7

tableau 15 : rapports des éléments minéraux dans les feuilles et dans la solution 3-Phosphore

d) EFFET DE LA SOLUTION 4-POTASSIUM

Cette solution conduit à l'obtention de feuilles dont la teneur en azote est plutôt élevée et la teneur en calcium plutôt faible (tableau 16). Malgré une forte concentration en potassium dans la solution nutritive cet élément se trouve en quantité "normale" dans les feuilles.

Pour ce qui est des rapports entre éléments chaque fois que l'azote et le calcium se trouvent en numérateur ces rapports sont respectivement plus élevés et plus bas que les valeurs habituelles (tableau 17).

	teneur en éléments minéraux (g. en % de la M.S.)					
éléments minéraux	N	S	P	K	Ca	Mg
nos résultats	3,35	0,32	0,23	1,84	1,39	0,21

tableau 16 : composition minérale des feuilles des plantes cultivées sur la solution 4-Potassium.

rapports	N/P	K/P	K/Mg	Ca/Mg
rapports dans les feuilles	14,9	8,2	8,7	6,5
rapports dans la solution	1,3	5,7	9,8	1,7

tableau 17 : rapports des éléments minéraux dans les feuilles et dans la solution 4-Potassium.

e) EFFET DE LA SOLUTION 5-CALCIUM

Avec cette solution enrichie en calcium les teneurs des feuilles sont le plus souvent dans les limites admises ; seule la teneur en phosphore est légèrement plus élevée. Il faut noter ici que la teneur en calcium bien que n'atteignant pas la limite supérieure se trouve à un niveau relativement élevé (tableau 18).

Les rapports entre éléments principaux sont eux aussi très voisins des valeurs normales, seul le rapport N/P est un peu plus faible en raison de la forte teneur foliaire en phosphore (tableau 19).

	teneur en éléments minéraux (g en % de la M.S.)					
éléments minéraux	N	S	P	K	Ca	Mg
nos résultats	2,26	0,30	0,31	1,44	2,50	0,28

tableau 18 : composition minérale des feuilles des plantes cultivées sur la solution 5-Calcium

rapports	N/P	K/P	K/Mg	Ca/Mg
rapports dans les feuilles	7,4	4,7	5,2	9,1
rapports dans la solution	1,3	1,9	3,3	5,0

tableau 19 : rapports des éléments minéraux dans les feuilles et dans la solution 5-Calcium

f) EFFET DE LA SOLUTION 6-MAGNESIUM

Les feuilles obtenues sur cette solution nutritive ont une teneur assez élevée en phosphore et en magnésium. La teneur en calcium au contraire se trouve à un niveau très bas (tableau 20). Le rapport Ca/Mg est ainsi à un niveau très bas mais il faut remarquer que dans la solution nutritive aussi il est exceptionnellement faible à cause de la teneur très élevée en magnésium (tableau 21). Il apparaît d'ailleurs que tous les rapports ayant le magnésium en dénominateur, que ce soit dans les solutions ou dans les feuilles, s'établissent à un niveau très bas.

	teneur en éléments minéraux (g en % de la M.S.)					
éléments minéraux	N	S	P	K	Ca	Mg
nos résultats	2,61	0,24	0,30	1,32	1,34	0,44

tableau 20 : composition minérale des feuilles des plantes cultivées sur la solution 6-Magnésium

rapports	N/P	K/P	K/Mg	Ca/Mg
rapports dans les feuilles	8,6	4,4	3,0	3,1
rapports dans la solution	1,34	1,9	1,1	0,6

tableau 21 : rapports des éléments minéraux dans les feuilles et dans la solution 6-Magnésium.

g) EFFET DE LA SOLUTION 7-HUGLIN

L'analyse des tableaux suivants fait ressortir que cette solution nutritive a donné des feuilles dont la teneur en éléments minéraux est dans la fourchette admise habituellement. Cependant en raison de la teneur en azote assez élevée (tableau 22) le rapport N/P dépasse les valeurs habituelles (tableau 23).

	teneur en éléments minéraux (g en % de la M.S.)					
éléments minéraux	N	S	P	K	Ca	Mg
nos résultats	3,06	0,30	0,23	1,56	2,04	0,29

tableau 22 : composition minérale des feuilles des plantes cultivées sur la solution 7-Huglin

rapports	N/P	K/P	K/Mg	Ca/Mg
rapports dans les feuilles	13,6	6,9	5,4	7,1
rapports dans la solution	2,7	5,4	5,1	1,7

tableau 23 : rapport des éléments minéraux dans les feuilles et dans la solution 7-Huglin

h) EFFET DE LA SOLUTION 8-HOMES

Les résultats mentionnés dans les tableaux suivants (tableaux 24 et 25) montrent qu'il n'y a rien de particulier à signaler concernant la composition minérale des feuilles obtenues sur la solution 8-Homès, aussi bien en ce qui concerne la teneur en éléments minéraux principaux que pour les rapports entre éléments ; seul le rapport Ca/Mg est un peu bas du fait des teneurs plutôt faibles en calcium et élevées en magnésium.

	teneur en éléments minéraux (g en % de la M.S.)					
éléments minéraux	N	S	P	K	Ca	Mg
nos résultats	2,43	0,22	0,21	1,39	2,07	0,30

tableau 24 : composition minérale des feuilles des plantes cultivées sur la solution 8-Homès

rapports	N/P	K/P	K/Mg	Ca/Mg
rapports dans les feuilles	11,6	6,6	4,6	6,8
rapports dans la solution	4,0	4,7	3,2	2,2

tableau 25 : rapport des éléments minéraux dans les feuilles et dans la solution 8-Homès.

i) EFFET DE LA SOLUTION 9-BECQUET

Là aussi les teneurs en éléments minéraux se trouvent dans les limites admises (tableau 26). Les rapports des éléments minéraux entre eux sont cependant plutôt élevés chaque fois que le phosphore est en dénominateur et plutôt faible chaque fois que le calcium est en numérateur (tableau 27).

	teneur en éléments minéraux (g en % de la M.S)					
éléments minéraux	N	S	P	K	Ca	Mg
nos résultats	2,65	0,25	0,24	1,47	1,80	0,25

tableau 26 : composition minérale des feuilles des plantes cultivées sur la solution 9-Becquet

rapports	N/P	K/P	K/Mg	Ca/Mg
rapports dans les feuilles	11,1	6,1	5,9	7,2
rapports dans la solution	4,5	10,0	5,1	4,2

tableau 27 : rapports des éléments minéraux dans les feuilles et dans la solution 9-Becquet.

CONCLUSION

Ces résultats qui seront soumis à comparaison dans la suite du développement montrent :

1) qu'un rapport entre la composition minérale des feuilles et de la solution nutritive ne peut pas être établi de manière simple.

2) que la teneur en calcium a le plus souvent été assez basse et toujours nettement en dessous de la valeur maximale ; cela peut tenir soit au fait que nos références sont trop élevées, c'est-à-dire non conformes au type de matériel que nous avons analysé soit que toutes nos solutions sont défavorables à l'absorption du calcium. Nous aurons l'occasion de revenir sur ce problème et de choisir l'une des deux hypothèses.

3) que pour tous les éléments minéraux, selon les solutions nutritives nous avons presque atteint ou dépassé les valeurs que la bibliographie nous avait fournies comme limites.

2) COMPOSITION MINERALE DES RAMEAUX

Afin de permettre des comparaisons plus faciles entre nos divers résultats nous avons groupé sur une même page (tableau 28) les chiffres concernant la composition minérale des feuilles, des rameaux verts, des rameaux aoûtés et des racines obtenus sur toutes les solutions nutritives expérimentées.

D'autre part nous avons fourni les résultats obtenus par DELMAS (1971) pour les rameaux aoûtés et les racines cultivés sur sa solution "standard". Rappelons qu'en ce qui concerne les feuilles les valeurs de comparaisons très nombreuses obtenues par d'autres auteurs ont été données de ma-

	Solutions nutritives.	Eléments minéraux (g pour 100 g de M.S.)						
		N	S	P	K	Ca	Mg	Total
FEUILLES	1-Azote	3,15	0,23	0,23	1,38	1,95	0,29	7,23
	2-Soufre	3,04	0,24	0,24	1,44	1,98	0,33	7,27
	3-Phosphore	3,97	0,21	0,36	1,38	1,29	0,32	7,53
	4-Potassium	3,35	0,32	0,23	1,48	1,39	0,21	7,34
	5-Calcium	2,26	0,30	0,31	1,44	2,50	0,28	7,09
	6-Magnésium	2,61	0,24	0,30	1,32	1,34	0,44	6,25
	7-Huglin	3,06	0,30	0,23	1,56	2,04	0,29	7,48
	8-Homès	2,43	0,22	0,21	1,39	2,07	0,30	6,62
	9-Becquet	2,65	0,25	0,24	1,47	1,80	0,25	6,66
	MOYENNE	3,10	0,26	0,26	1,47	1,82	0,30	7,05
RAMEAUX VERTS	1-Azote	1,68	0,11	0,16	1,16	1,71	0,18	5,00
	2-Soufre	1,56	0,12	0,17	1,21	1,76	0,22	5,04
	3-Phosphore	1,68	0,12	0,22	1,18	1,01	0,21	4,42
	4-Potassium	1,73	0,14	0,60	1,22	1,12	0,14	4,95
	5-Calcium	1,48	0,12	0,17	1,23	1,83	0,17	5,00
	6-Magnésium	1,66	0,10	0,17	1,08	1,14	0,36	4,51
	7-Huglin	1,71	0,17	0,16	1,32	1,76	0,16	5,28
	8-Homès	1,36	0,12	0,16	1,14	1,78	0,19	4,75
	9-Becquet	1,58	0,17	0,18	1,31	1,51	0,16	4,91
	MOYENNE	1,60	0,13	0,17	1,21	1,51	0,20	4,87
RAMEAUX AOUTES	1-Azote	1,22	0,15	0,11	1,66	0,76	0,14	4,04
	2-Soufre	1,26	0,11	0,12	2,13	0,67	0,13	4,42
	3-Phosphore	1,30	0,10	0,14	1,68	0,81	0,15	4,18
	4-Potassium	1,31	0,12	0,11	2,71	0,59	0,11	4,95
	5-Calcium	1,13	0,11	0,11	1,78	0,83	0,10	4,06
	6-Magnésium	1,34	0,11	0,11	1,43	0,71	0,19	3,89
	7-Huglin	1,47	0,12	0,11	2,24	0,68	0,13	4,75
	8-Homès	1,65	0,11	0,10	1,46	0,75	0,10	4,17
	9-Becquet	1,28	0,15	0,12	1,73	0,70	0,14	4,12
	MOYENNE	1,32	0,12	0,12	1,87	0,72	0,13	4,28
	Valeurs de DELMAS(1971) (Partie inf. des rameaux)	0,81		0,14	0,52	0,80	0,14	
RACINES	1-Azote	1,98	0,47	0,23	1,96	1,83	0,22	6,69
	2-Soufre	1,64	0,57	0,22	3,08	1,69	0,20	7,40
	3-Phosphore	1,60	0,43	0,30	2,94	1,76	0,20	7,23
	4-Potassium	2,04	0,41	0,22	3,20	1,53	0,16	7,56
	5-Calcium	1,78	0,40	0,20	2,46	1,78	0,16	6,78
	6-Magnésium	1,92	0,42	0,18	2,06	1,46	0,40	6,44
	7-Huglin	1,68	0,39	0,26	3,18	1,66	0,16	7,33
	8-Homès	1,26	0,40	0,18	2,87	1,58	0,25	6,54
	9-Becquet	2,10	0,37	0,26	2,96	1,73	0,17	7,59
	MOYENNE	1,80	0,43	0,23	2,75	1,67	0,21	7,09
	Valeurs de DELMAS(1971) (Racines fines)	1,86		0,16	0,87	2,00	0,38	

Tableau **28**: composition minérale des parties végétales de la vigne cultivée sur des solutions nutritives différentes. (exprimé en g sur 100 g de matière sèche) (résultats de l'année 1972)

nière détaillée ; et en ce qui concerne les rameaux verts nous n'avons pu trouver de résultats pouvant servir de référence.

a) RAMEAUX VERTS

Le tableau 28 résume les résultats analytiques de la composition minérale des rameaux verts, c'est-à-dire de toute la partie se trouvant au-dessus de la portion aoûtée. On constate dès l'abord que la teneur en éléments minéraux est nettement plus faible que celle des feuilles puisque la concentration totale en éléments principaux passe de 7,05% à 4,87%. La teneur en certains éléments minéraux est de l'ordre de la moitié de celle des feuilles (en N et S, parfois P et Mg), les autres ont des niveaux qui demeurent toujours plus faibles que ceux des feuilles.

On peut rappeler ici que la teneur en matière sèche des rameaux verts est du même ordre de grandeur que celle des feuilles. La teneur plus faible en éléments minéraux implique une composition chimique différente de celle des feuilles et probablement une teneur en molécules organiques à faible contenu minéral plus importante que celle des feuilles.

b) RAMEAUX AOÛTES

Avec les résultats de l'analyse des rameaux aoûtés (tableau 28) nous constatons encore une diminution de la teneur en certains éléments minéraux, c'est le cas du calcium par exemple dont la concentration diminue jusqu'à la moitié de celle des rameaux verts et jusqu'au tiers de celle des feuilles. La teneur en azote (sauf pour la solution 8-Homès) en phosphore et en magnésium est encore en diminution par rapport à celle des rameaux verts, tandis que le soufre est au même niveau que celui des rameaux verts. Le seul élément qui augmente dans les rameaux aoûtés est le potassium ; il dépasse pour toutes les solutions nutritives le niveau observé dans les feuilles.

Si l'on compare nos résultats avec ceux obtenus par DELMAS (1971) nos rameaux contiennent plus d'azote et de potassium et à peu près

autant de phosphore, calcium et de magnésium. Cette différence peut provenir soit de la différence de composition chimique des solutions nutritives (concentration et composition minérale), celle utilisée par DELMAS étant en particulier nettement plus diluée que les nôtres ; soit de l'état différent des rameaux analysés : l'âge physiologique étant nettement plus avancé dans le cas des rameaux étudiés par DELMAS (chute des feuilles) que chez nous (maturité des fruits).

3) COMPOSITION MINERALE DES RACINES

Globalement, la teneur des racines en éléments minéraux principaux se situe à 7,09%. Elle est donc très voisine de celle des feuilles. Cependant on constate que pour arriver à ce résultat deux éléments varient de manière assez importante et en sens inverse ; il s'agit du potassium dont la teneur racinaire est très élevée et de l'azote qui se trouve dans les racines en quantité nettement moins importante que dans les feuilles (tableau 28).

La comparaison de nos résultats avec ceux obtenus par DELMAS (1971) fait apparaître des valeurs de même ordre de grandeur sauf pour le potassium qui se rencontre en quantité beaucoup plus importante dans les racines obtenues sur nos solutions nutritives que dans les racines obtenues sur la solution "standard" de DELMAS. Là encore nos analyses sont effectuées à un stade phénologique plus précoce que celui retenu par DELMAS. Or, à l'époque de la maturité de ces fruits la vigne consomme une grande quantité d'eau c'est-à-dire que ses racines sont encore très actives ; ce caractère nous paraît pouvoir être invoqué pour la compréhension de la teneur très élevée en potassium.

CONCLUSION :

Cette première étude de nos résultats et de leur comparaison rapide à ceux obtenus par d'autres chercheurs nous montre que la variabilité de composition chimique de la feuille semble très grande.

En ce qui concerne les rameaux et les racines les résultats que

nous avons obtenus sont dans l'ensemble très comparables à ceux de DELMAS. Cependant, en raison de l'influence des conditions générales de culture sur les caractères de l'alimentation minérale, cette comparaison avec des résultats obtenus dans d'autres conditions ne peut être que très superficielle ; nous nous proposons donc d'essayer de comparer maintenant entre eux nos résultats obtenus tous dans des conditions aussi identiques que possible

II - ETUDE ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS POUR LA FEUILLE SUR LES DIFFERENTES SOLUTIONS NUTRITIVES

1) ASPECT GLOBAL

Nous nous proposons d'essayer de comparer entre elles les différentes parties de la vigne dans le domaine de leur teneur en éléments minéraux principaux.

La figure 13 qui fournit la moyenne des résultats analytiques obtenus en 1971 et en 1972 (chaque colonne représente donc la moyenne de 18 analyses) permet de constater que pour S, P et Mg les teneurs de tous les organes de la vigne sont très faibles et toujours inférieures à 0,5% de la matière sèche. Au contraire pour N, K et Ca les teneurs de tous les organes de la vigne sont nettement plus élevées, le plus souvent comprises entre 1 et 2%.

Sur le plan pratique cela implique que la consommation de phosphore par la vigne soit de l'ordre de 8 à 10 fois plus faible que la consommation d'azote et de potassium.(*) Ce caractère pourrait être invoqué pour expliquer dans une certaine mesure la quasi impossibilité de mettre en évidence, dans les conditions naturelles, une réaction de la vigne à la fumure phosphatée.

D'autre part ces résultats nous permettent de classer les éléments minéraux en fonction de la teneur existant dans les différentes parties

---

(*) : Ce résultat pourrait être encore plus marqué du fait que les teneurs en phosphore que nous avons obtenues sont le plus souvent élevées et qu'elles dépassent même parfois les normes admises, ainsi que nous l'avons déjà signalé.

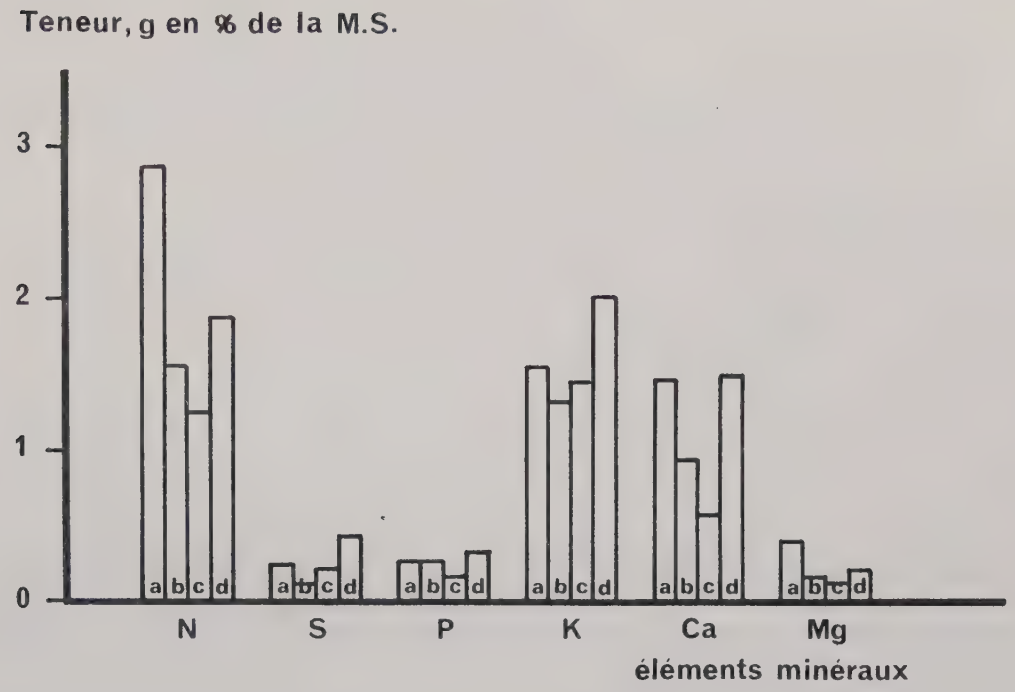


Figure **13** : teneur moyenne en éléments minéraux (g pour 100 g de matière sèche) des parties végétales de la vigne cultivée en hydroponique sur différentes solutions nutritives (moyenne de deux années)

a) feuilles
b) rameaux verts
c) rameaux aoûtés
d) racines

de la vigne. Dans le tableau 29 nous avons donné les différentes parties végétales par ordre de teneur décroissante dans les six éléments considérés en les séparant par le signe "inférieur" si la différence est importante ou "peu différent" si la différence est peu marquée. Il apparaît dans ce tableau que la teneur la plus élevée se rencontre pour la plupart des éléments soit dans la feuille soit dans la racine et que la teneur la plus faible dans tous les éléments se trouve dans le rameau aoûté. Nous avons déjà proposé d'expliquer ce phénomène par la dilution de la matière sèche minérale du fait de l'accumulation de très abondantes réserves organiques au cours de l'aoûtement.

élément minéral considéré	classement des différentes parties de la plante en fonction de leur teneur en éléments principaux.
Azote	feuille > racine ≠ rameau vert ≠ rameau aoûté
Soufre	racine > feuille ≠ rameau vert ≠ rameau aoûté
Phosphore	feuille > racine ≠ rameau vert ≠ rameau aoûté
Potassium	racine ≠ rameau vert ≠ feuille ≠ rameau aoûté
Calcium	feuille ≠ racine ≠ rameau vert ≠ rameau aoûté
Magnésium	feuille > racine ≠ rameau vert ≠ rameau aoûté

tableau 29: classement des différentes parties de la plante en fonction de leur teneur en éléments principaux.

2) RELATION POUR CHAQUE ELEMENT ENTRE SA TENEUR DANS LA PLANTE ET DANS LA SOLUTION NUTRITIVE EN FONCTION DES CARACTERES DE LA SOLUTION NUTRITIVE DONT IL PROVIENT

Les figures 14 à 19 permettent de comparer la teneur en éléments minéraux des feuilles et des solutions nutritives pour chacune des solutions expérimentées. Pour comparer l'effet des solutions nutritives sur la composition minérale des feuilles nous prendrons en considération de manière prépondérante les six premières solutions dans lesquelles la composition des éléments minéraux change de manière systématique (voir le chapitre concernant les solutions nutritives et les tableaux 1 et 2).

a) AZOTE

Pour l'étude de la variation de la teneur en azote des feuilles, nous pouvons séparer les solutions nutritives en deux groupes : groupe à élément dominant anionique (solutions 1 - 2 - 3), groupe à élément dominant cationique (solutions 4 - 5 - 6). Une mention spéciale sera toujours faite de la solution dont l'élément dominant est celui étudié.

La figure 14 concernant la variation de teneur en azote montre que les trois solutions cationiques, dont la contenance en azote est identique, fournissent des teneurs en azote très différentes puisqu'elles s'étagent entre 2,26% et 3,35% environ. Les solutions à élément cationique dominant contiennent soit très peu d'azote soit au contraire une très grande quantité d'azote. Cette variation ne se reflète pas du tout dans la teneur foliaire, bien au contraire puisque la solution 3-Phosphore qui ne contient que 70mg/l d'azote a fourni la plus forte concentration foliaire au moins en 1972. Il faut remarquer d'autre part que les résultats obtenus sont assez voisins pour les deux années d'expérimentation ou tout au moins que les différences entre les solutions nutritives sont beaucoup plus importantes que les différences entre les années.

La figure 10 permet en outre de replacer les caractères de l'alimentation sur des solutions témoins (7-Huglin, 8-Homès, 9-Becquet) par rapport à nos solutions expérimentales et montre que les différences entre les deux groupes de solutions sont assez peu marquées ce qui revient à dire que les solutions expérimentales fournissent des croissances de même ordre de grandeur que les solutions témoins.

b) SOUFRE

La figure 15 montre que la forte teneur en soufre de la solution 2-Soufre ne se marque par aucune élévation de la teneur foliaire en cet élément. Au contraire les solutions 5-Calcium et 7-Huglin conduisent régulièrement à des concentrations élevées. Les résultats obtenus pour les deux années consécutives restent assez voisins.

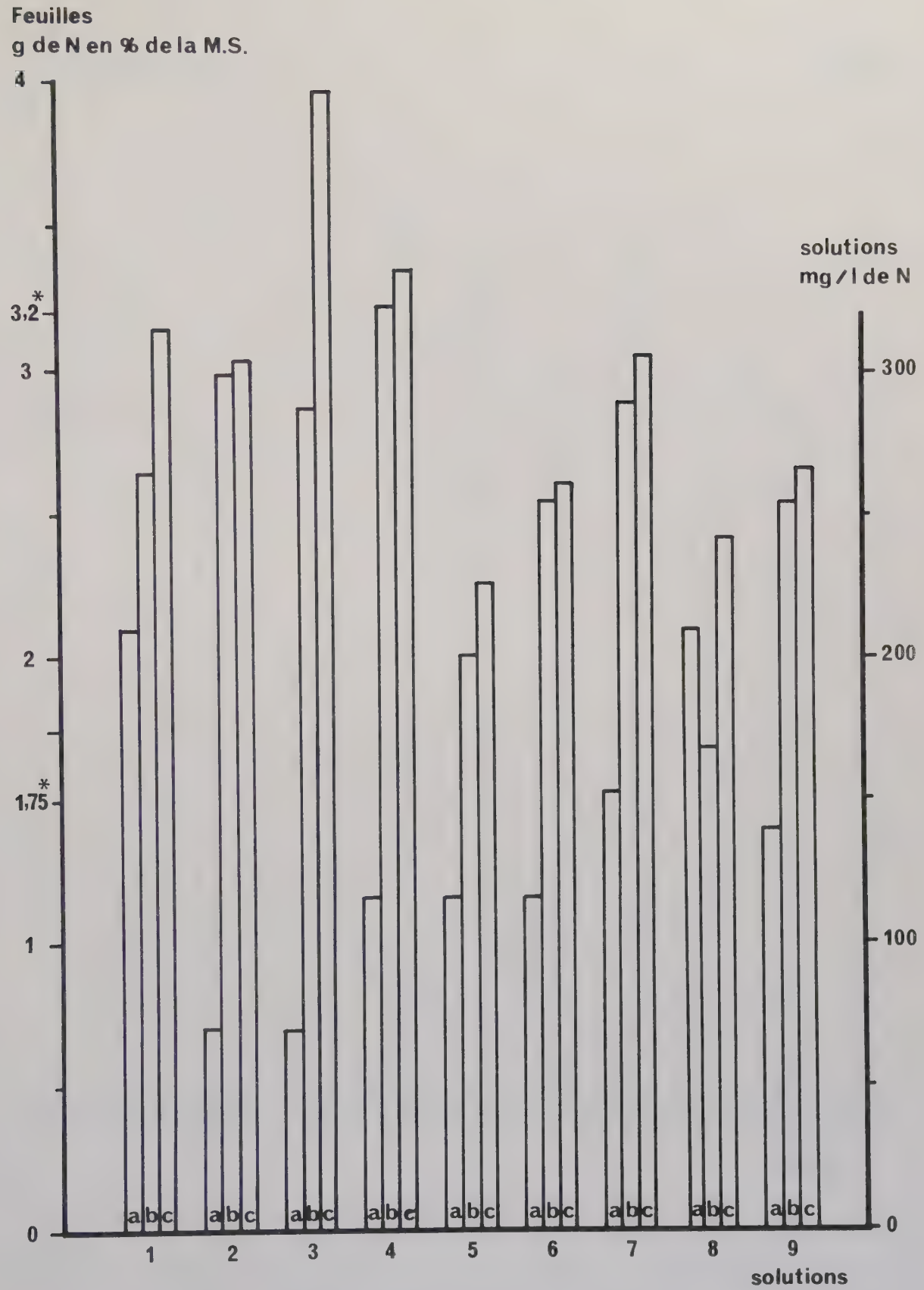


Figure **14** : teneur en azote des feuilles (g pour 100 g de matière sèche) en fonction de la composition minérale des solutions nutritives et de leur concentration en azote.

a) concentration en azote des solutions nutritives
b) teneur en azote des feuilles en 1971
c) teneur en azote des feuilles en 1972
*) limites des teneurs habituellement admises

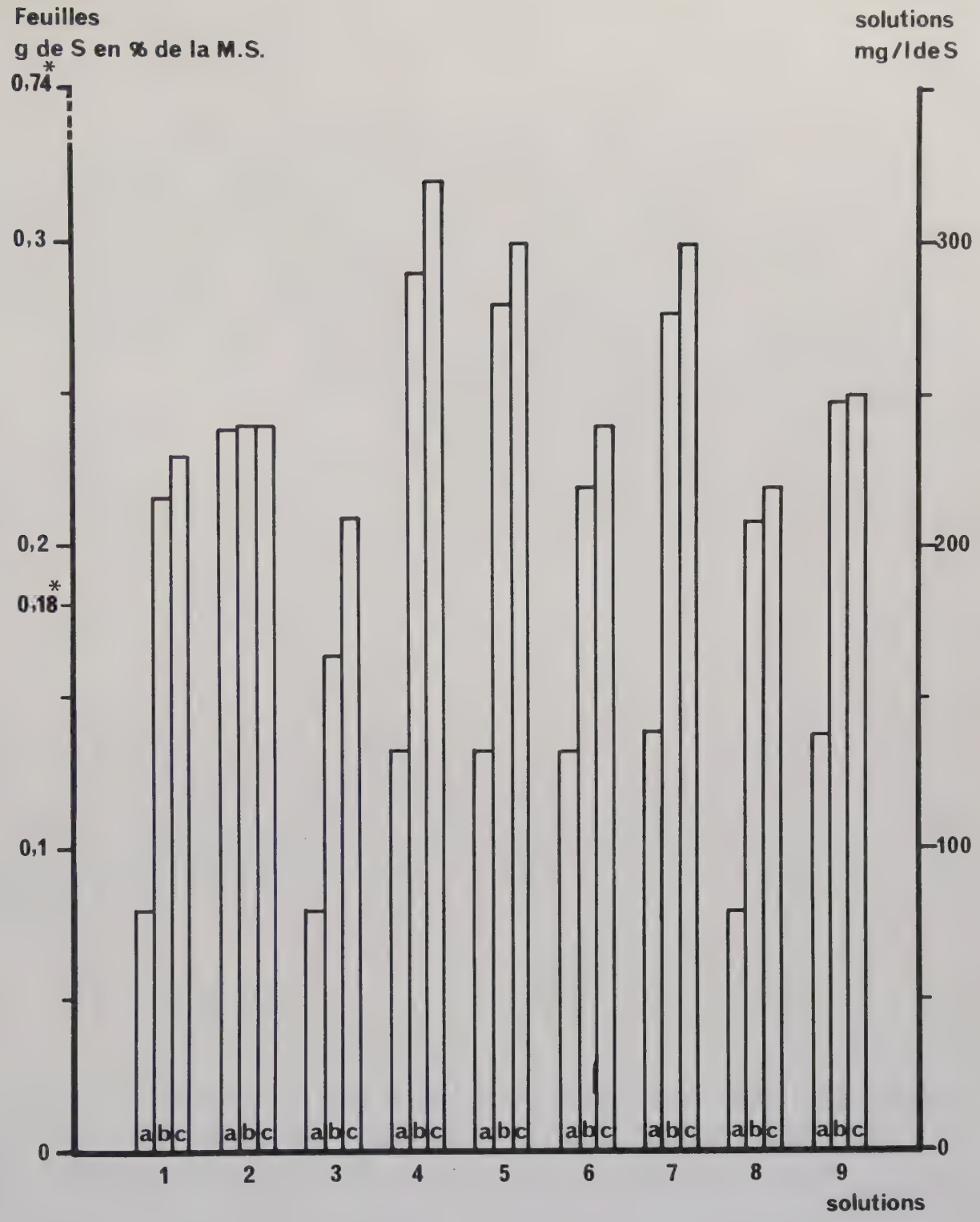


Figure **15** : teneur en soufre des feuilles (g pour 100 g de matière sèche) en fonction de la composition minérale des solutions nutritives et de leur concentration en soufre.

a) concentration en soufre des solutions nutritives
b) teneur en soufre des feuilles en 1971
c) teneur en soufre des feuilles en 1972
*) limites des teneurs habituellement admises

c) PHOSPHORE

La figure 16 montre que la teneur en phosphore est toujours très élevée et dépasse souvent les normes admises. La solution 3-Phosphore qui est la plus riche en phosphore conduit à l'obtention des feuilles les plus riches en cet élément. Cependant le parallélisme n'est pas toujours respecté puisque les solutions 4-Potassium, 5-Calcium, 6-Magnésium dont le contenu en phosphore est identique conduisent à des teneurs en phosphore très variables bien que du même ordre de grandeur pour les deux années d'expérimentation. On peut rappeler ici que la solution 4 qui fournit des feuilles à contenu en phosphore le plus faible est très riche en potassium, élément qui pourrait entrainer un antagonisme avec le phosphore.

d) POTASSIUM

La figure 17 montre une teneur en potassium remarquablement constante puisqu'elle ne varie qu'entre 1,32% et 1,84% de la matière sèche foliaire. Des variations très importantes de la fourniture en potassium dans la solution nutritive restent donc à peu près sans effet, bien que les résultats bibliographiques nous aient permis de signaler des teneurs variant entre 0,15% et 3,85%.

e) CALCIUM

L'examen de la figure 18 fait ressortir que les feuilles de la deuxième année d'expérience ont des teneurs presque toujours très nettement plus élevées que celles de la première année d'expérience. En effet pendant la première année toutes les solutions nutritives avaient donné des feuilles ayant des teneurs en calcium inférieures à la limite minimale qui nous paraît cependant assez élevée.

Il est bien connu que la teneur en calcium augmente à mesure que la feuille prend de l'âge. Ici nous avons analysé ensemble les feuilles de tous les âges ce qui explique que la grande majorité de nos résultats se trouve

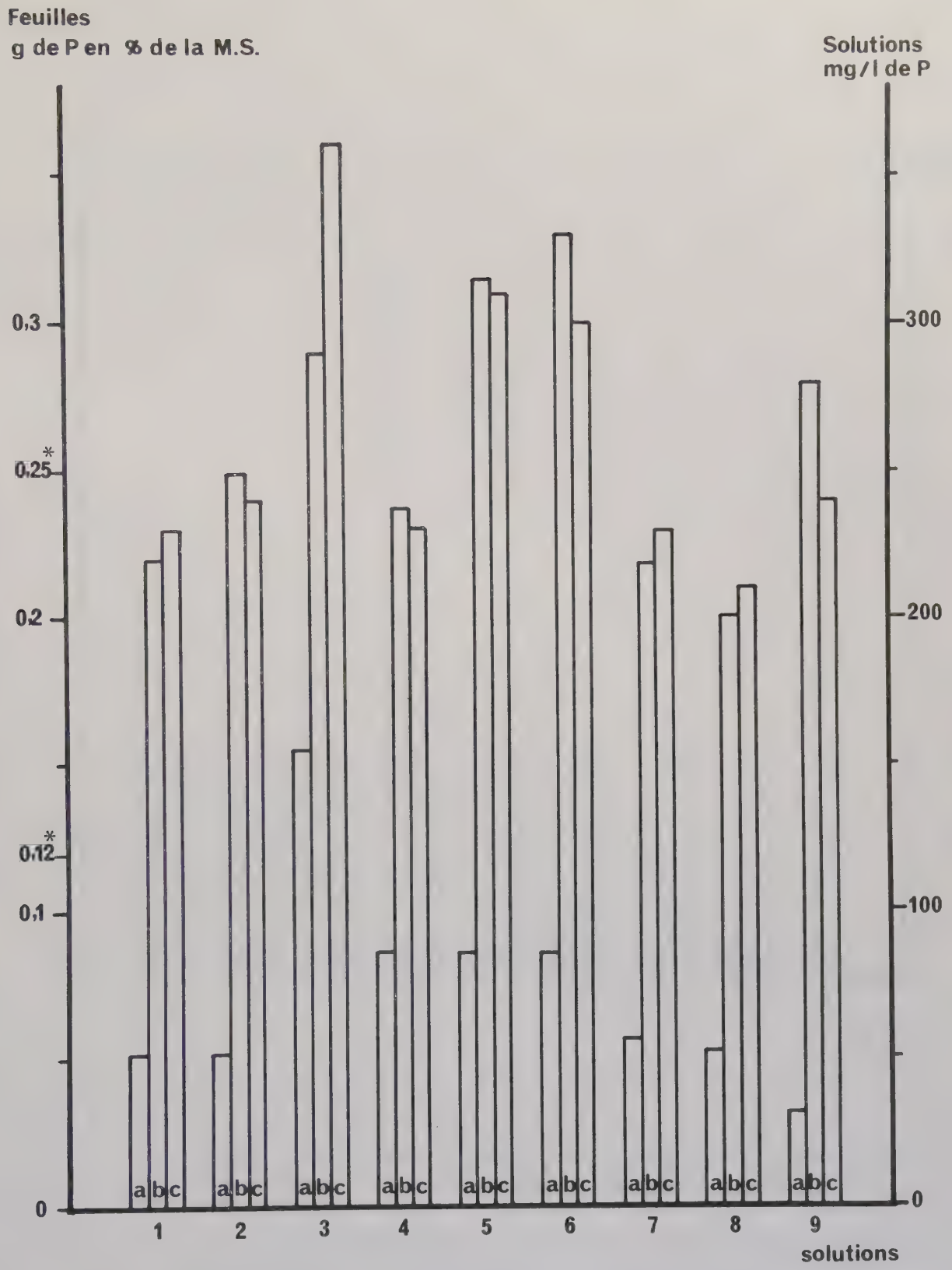


Figure **16** : teneur en phosphore des feuilles (g pour 100 g de matière sèche) en fonction de la composition minérale des solutions nutritives et de leur concentration en phosphore.

a) concentration en phosphore des solutions nutritives
b) teneur en phosphore des feuilles en 1971
c) teneur en phosphore des feuilles en 1972
*) limites des teneurs habituellement admises

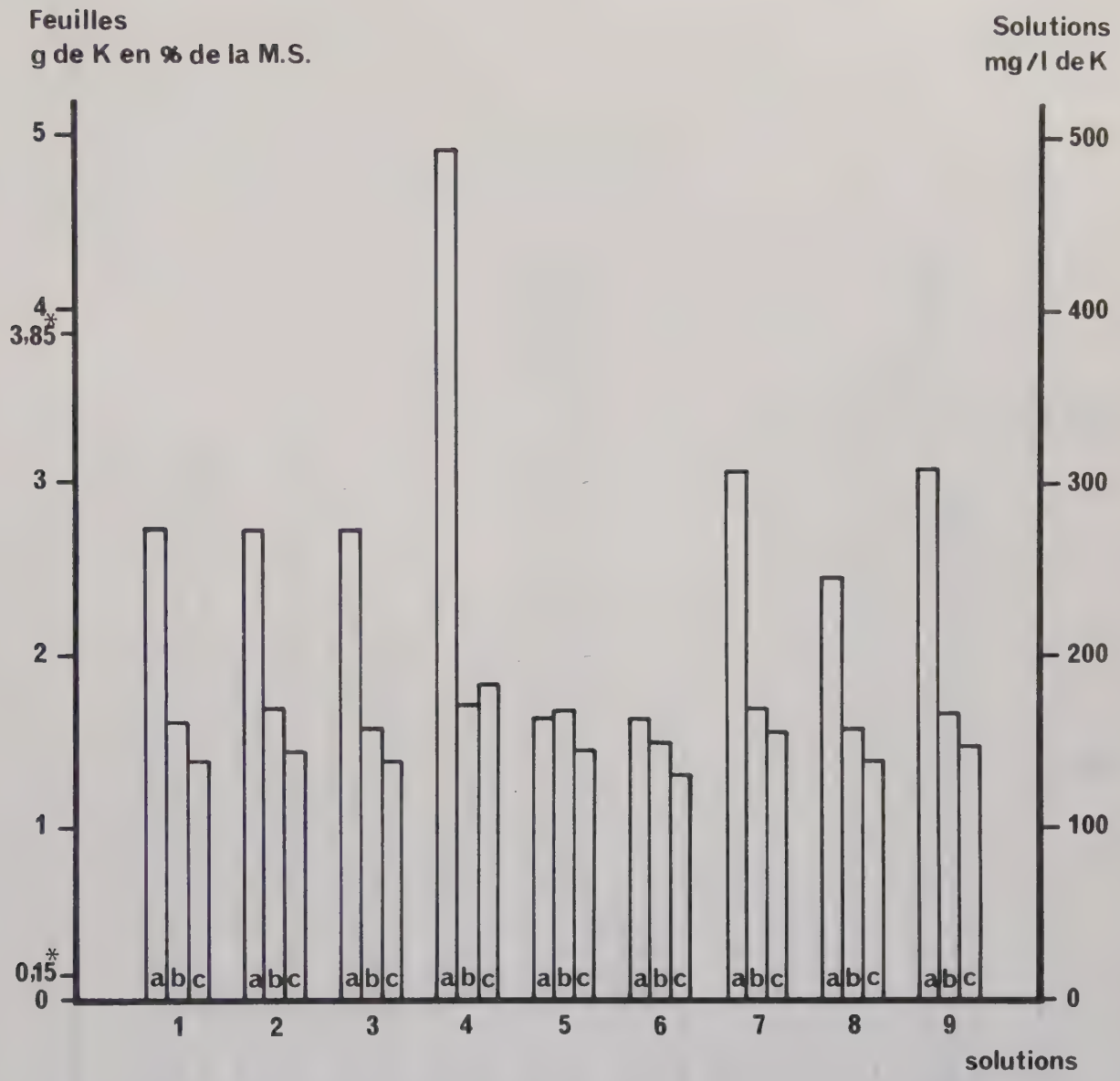


Figure **17** : teneur en potassium des feuilles (g pour 100 g de matière sèche) en fonction de la composition minérale des solutions nutritives et de leur concentration en potassium.

a) concentration en potassium des solutions nutritives
b) teneur en potassium des feuilles en 1971
c) teneur en potassium des feuilles en 1972
*) limites des teneurs habituellement admises

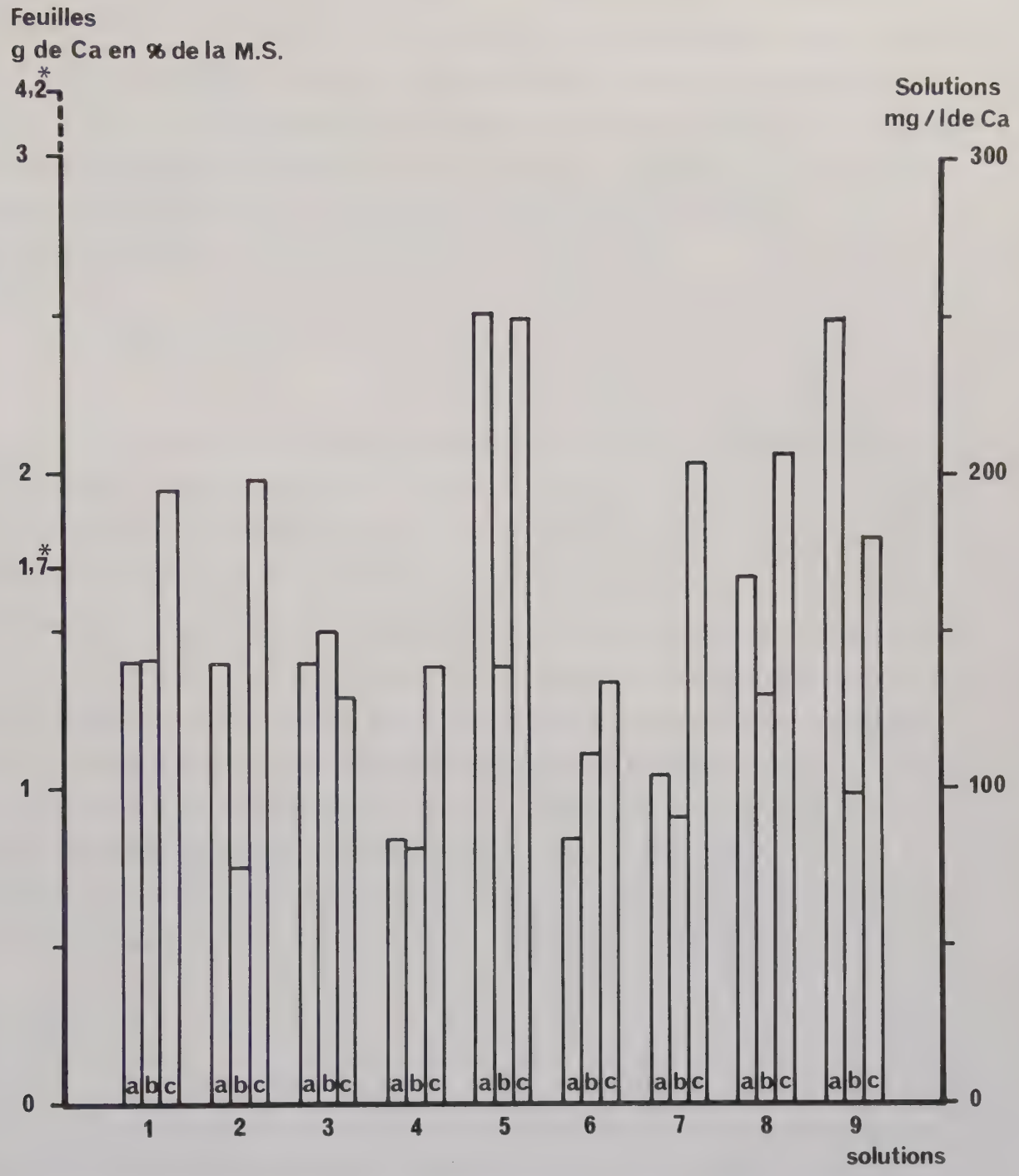


Figure 18 : teneur en calcium des feuilles (g pour 100 g de matière sèche) en fonction de la composition minérale des solutions nutritives et de leur concentration en calcium.

a) concentration en calcium des solutions nutritives
b) teneur en calcium des feuilles en 1971
c) teneur en calcium des feuilles en 1972
*) limites des teneurs habituellement admises

dans une gamme de teneur assez faible. En ce qui concerne la différence pourtant très marquée entre les deux années d'expérimentation aucune interprétation évidente de ce phénomène ne nous apparaît ; il faut cependant rappeler ici qu'en 1971 nous avons enlevé les rameaux anticipés à mesure de leur apparition alors qu'en 1972 nous les avons laissés ; le nombre de méristèmes en voie de croissance était donc beaucoup plus élevé en 1972 et la vitesse de croissance de chacun d'eux beaucoup plus faible.

f) MAGNESIUM

La figure 19 fait apparaître des caractères qui revêtent une certaine constance : par exemple les teneurs foliaires en magnésium de la deuxième année expérimentale ont toujours été inférieures à celles de la première année. La grandeur de la différence entre les deux années est de 0,1% à 0,2% sauf pour la solution 6-Magnésium enrichie en magnésium qui a fourni une teneur foliaire très élevée en 1971. Il est à noter aussi que les solutions 4-Potassium et 5-Calcium dans lesquelles la concentration magnésienne est la plus faible ont fourni les teneurs foliaires les plus faibles au cours des deux années d'expérimentation. Dans le même ordre d'idée les trois solutions à élément anionique dominant, qui contiennent la même quantité de magnésium ont produit des feuilles avec des concentrations en magnésium très voisines les unes des autres.

CONCLUSION

Il nous paraît bien difficile de dégager des idées directrices simples à partir des résultats de cette expérimentation. A quelques exceptions près il n'est pas possible d'établir une relation entre la teneur foliaire et la teneur de la solution en un élément. Des variations existent mais notre méthode expérimentale ne permet pas de les maîtriser. Le facteur de variabilité semble d'ailleurs tenir essentiellement à la physiologie de la plante qui réagit de manière très différente à des conditions voisines (voir courbes de croissance) en relation avec des caractères de sa physiologie propre (dormance des bourgeons, des tissus, corrélations entre les différentes parties

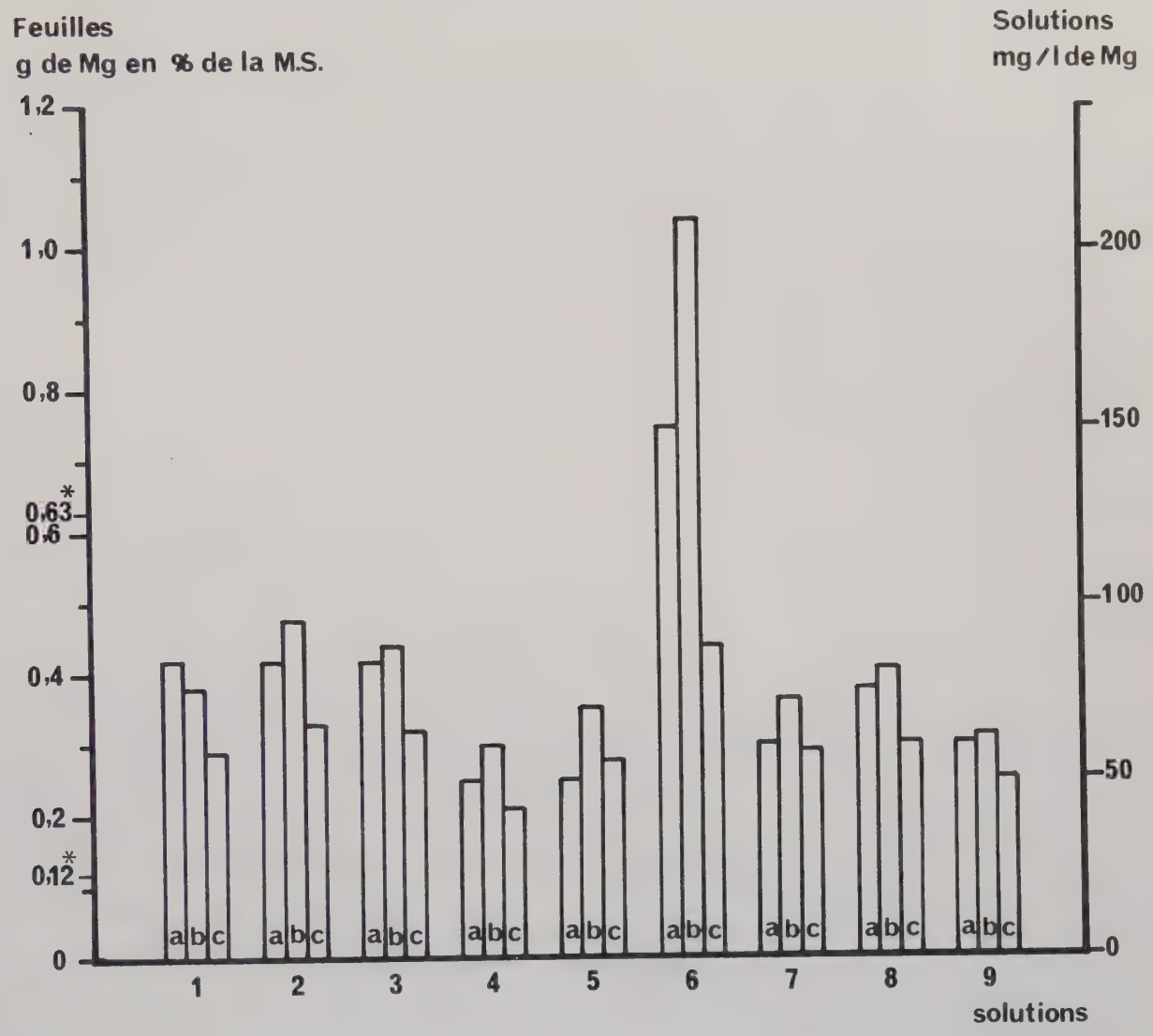


Figure **19** : teneur en magnésium des feuilles (g pour 100 g de matière sèche) en fonction de la composition minérale des solutions nutritives et de leur concentration en magnésium.

a) concentration en magnésium des solutions nutritives
b) teneur en magnésium des feuilles en 1971
c) teneur en magnésium des feuilles en 1972
*) limites des teneurs habituellement admises

du végétal, etc...).

III - ETUDE DES RAPPORTS ENTRE CERTAINS ELEMENTS MINERAUX

Dans le chapitre consacré à l'étude analytique des feuilles obtenues sur chacune des solutions nutritives nous avons déjà parlé des 4 rapports (N/P, K/P, K/Mg, Ca/Mg) concernant les interactions entre éléments généralement considérés comme les plus intenses. Cependant dans ce chapitre les comparaisons entre les différentes solutions nutritives ne peuvent être que très malaisées c'est pourquoi nous reprenons chacun des rapports dans les figures 20 à 24 que nous nous proposons de discuter rapidement ici.

1) RAPPORT N/P

On constate (figure 20) que les variations sont assez nettes selon les solutions nutritives mais que leur grandeur reste assez faible. Les valeurs du rapport N/P sont toujours légèrement supérieures pour la deuxième année d'expérimentation ; cela pourrait tenir au fait que la durée de l'expérience a été un peu plus courte la deuxième année, donc les vignes étaient un peu plus jeunes au moment de l'analyse.

Nous n'insisterons pas sur le fait que l'on ne peut mettre en évidence aucune corrélation entre le rapport N/P dans les solutions nutritives et dans la feuille.

2) RAPPORT K/P

Les conclusions que l'on peut tirer de la figure 21 sont très voisines quant'à leur esprit de celles tirées de la figure précédente. Là encore les relations sont le plus souvent d'assez faible amplitude et sans lien direct avec le rapport dans les solutions nutritives.

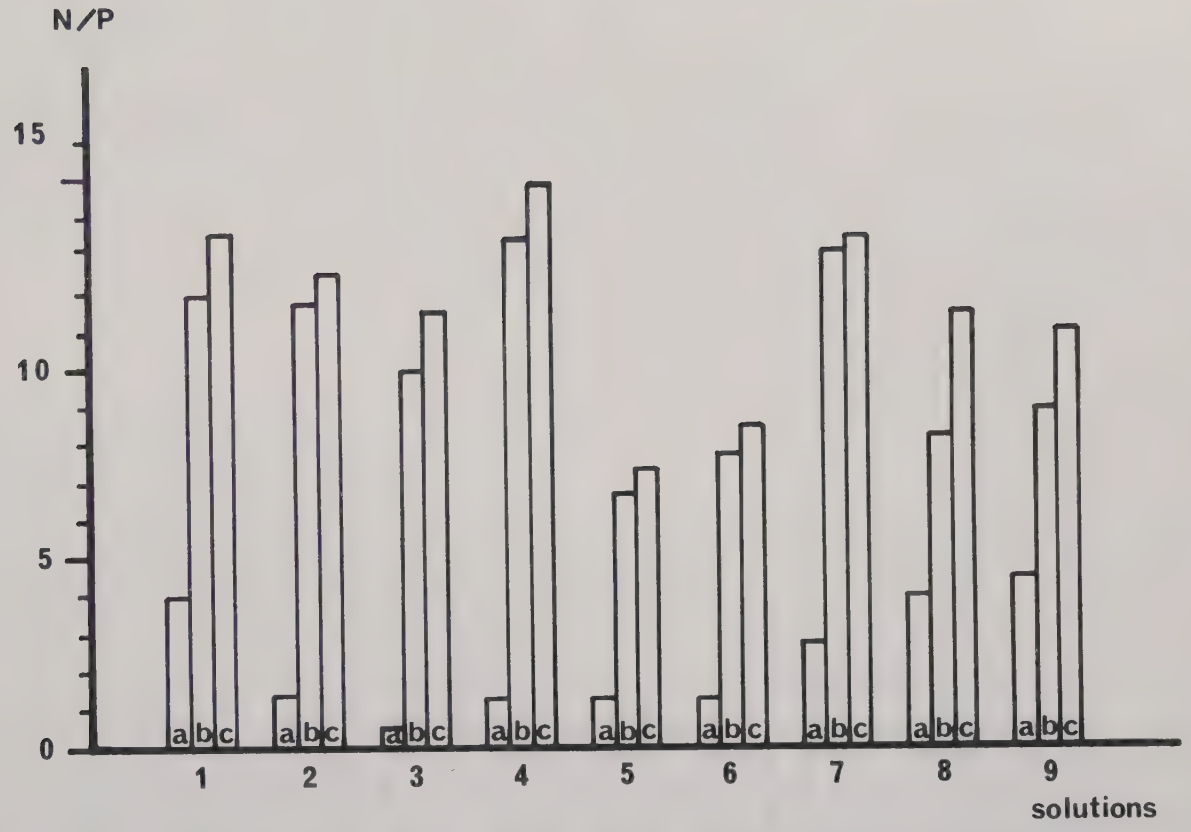


Figure **20** : rapport N/P des feuilles en fonction de la composition minérale des solutions nutritives et du rapport N/P de ces solutions.

a) N/P dans les solutions nutritives
b) N/P dans les feuilles en 1971
c) N/P dans les feuilles en 1972

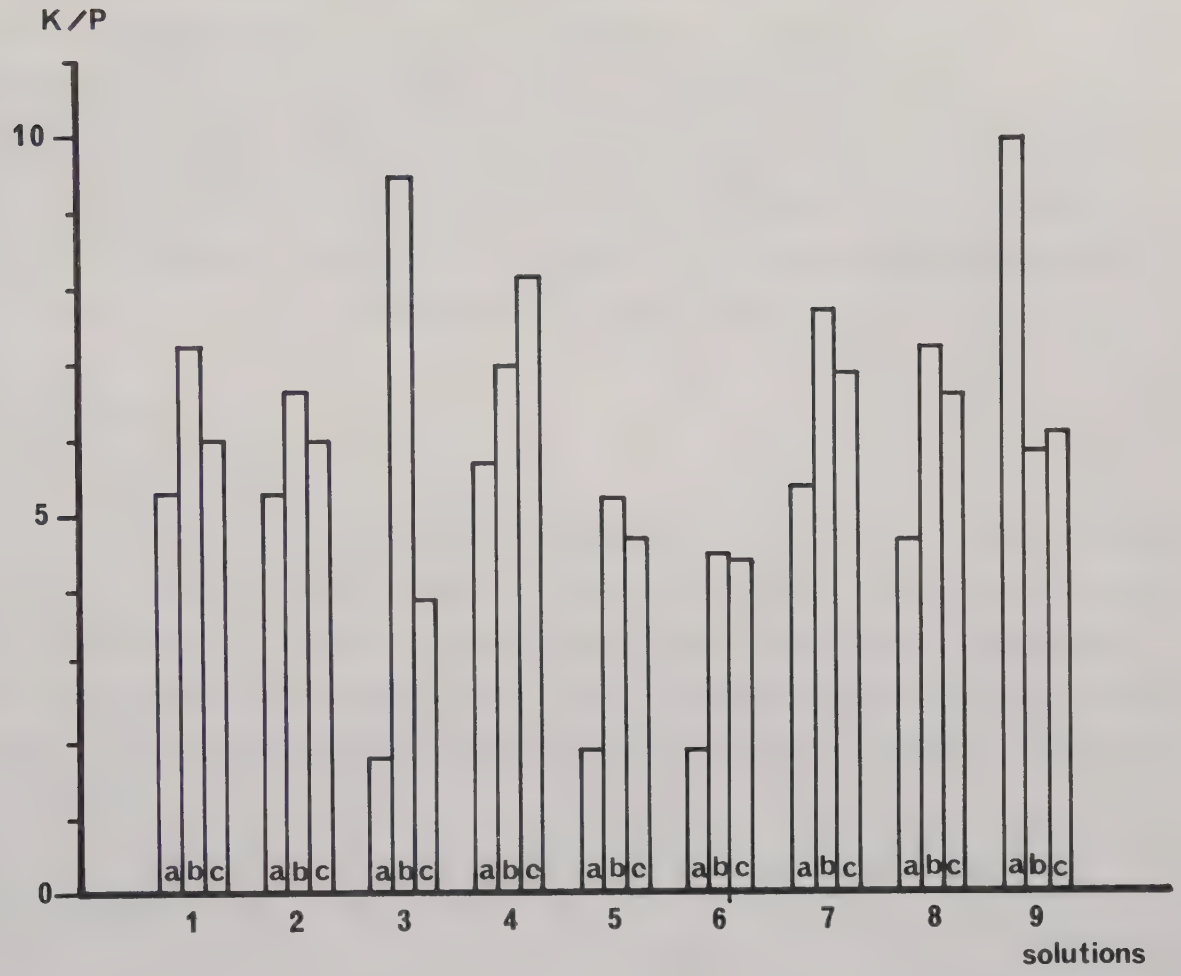


Figure **21** : rapport K/P des feuilles en fonction de la composition minérale des solutions nutritives et du rapport K/P de ces solutions.

a) rapport K/P dans les solutions nutritives
b) rapport K/P dans les feuilles en 1971
c) rapport K/P dans les feuilles en 1972

3) RAPPORT K/Mg

Le rapport K/Mg est le plus connu et le plus utilisé dans la pratique. Notre méthode analytique très différente du diagnostic foliaire ne peut lui être comparée sans précaution. Néanmoins il semble que l'on trouve ici (figure 22) une certaine relation entre le rapport K/Mg dans les solutions et dans les feuilles . Dans le cas qui nous intéresse cela tient essentiellement au fait que nous avons constaté un certain parallélisme entre la teneur de la solution et la teneur foliaire en magnésium. Le résultat dont nous parlons ici ne tient donc qu'au comportement du magnésium.

4) RAPPORT Ca/Mg

Là encore (figure 23) le magnésium se trouve au dénominateur de rapport considéré entrainant un certain parallélisme entre la solution nutritive et la feuille, mais ce parallélisme est très fortement masqué par les différences obtenues pour les teneurs en calcium des deux années expérimentales ; ces différences rendent les résultats peu cohérents et difficiles à interpréter.

CONCLUSION

Nous avons tenu à faire ce chapitre concernant les rapports car l'existence d'interactions entre éléments aurait pu être mise en évidence de manière claire. Il nous semble que les interactions qui sont toujours multiples sont trop complexes pour pouvoir être analysées de cette manière ; le rapport entre deux éléments étant tout au plus un argument complémentaire que l'on peut apporter dans la discussion, ce que nous avons fait d'ailleurs à différentes reprises.

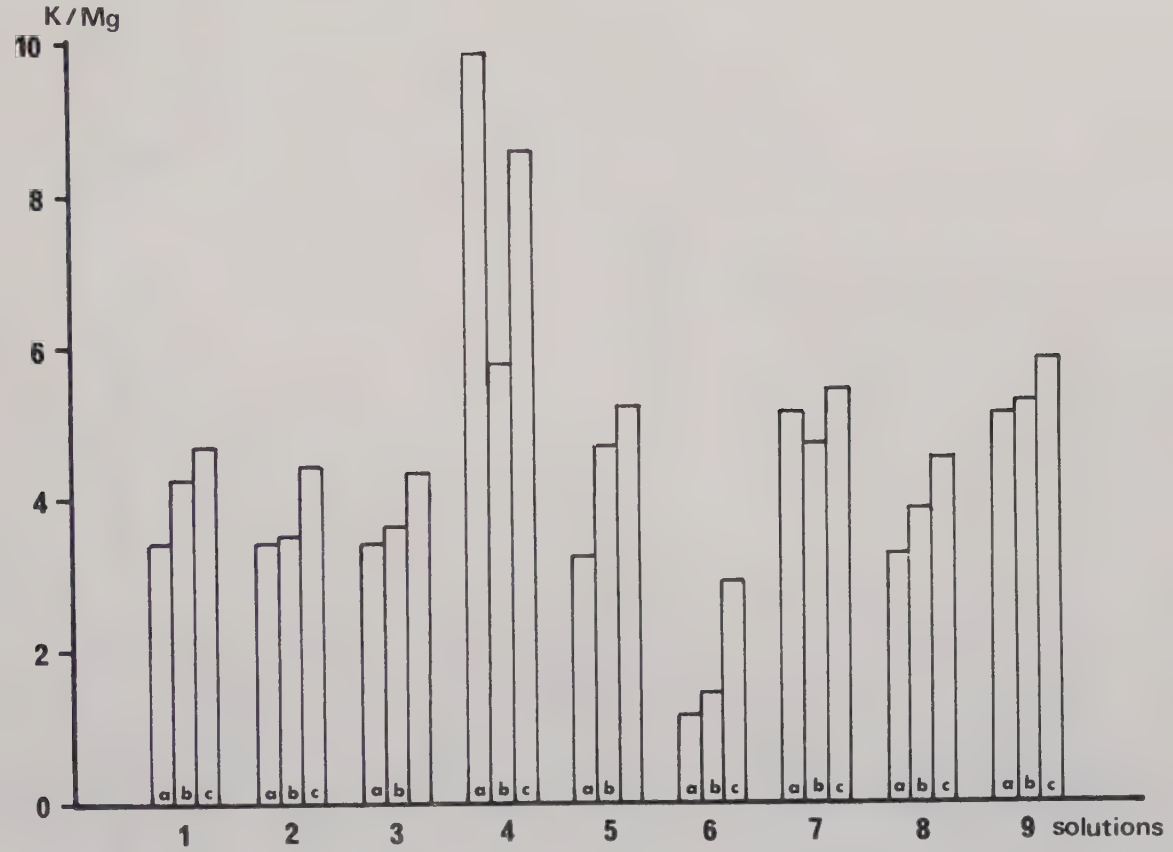


Figure 22: Rapport K/Mg des feuilles en fonction de la composition minérale des solutions nutritives et du rapport K/Mg de ces solutions

a) rapport K/Mg dans les solutions
b) rapport K/Mg dans les feuilles en 1971
c) rapport K/Mg dans les feuilles en 1972

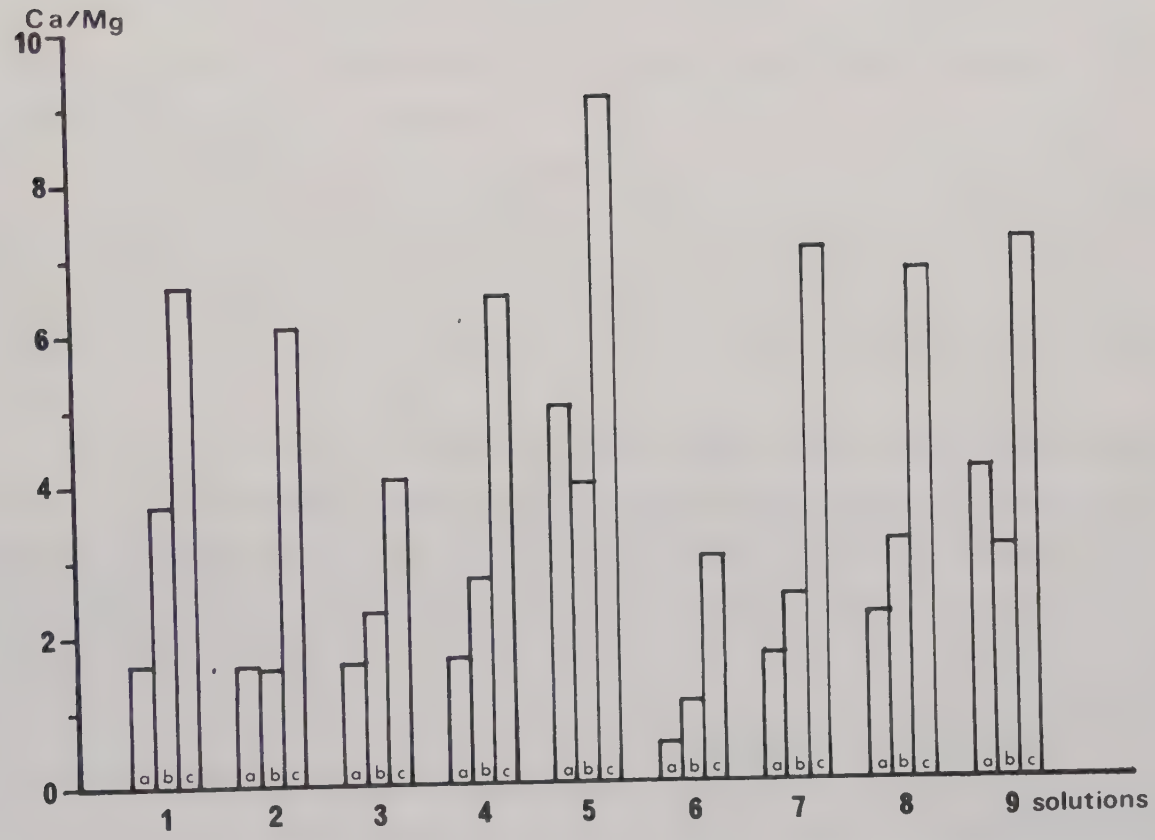


Figure **23**: Rapport Ca/Mg des feuilles en fonction de la composition minérale des solutions nutritives et du rapport Ca/Mg de ces solutions.

a) rapport Ca/Mg dans les solutions
b) rapport Ca/Mg dans les feuilles en 1971
c) rapport Ca/Mg dans les feuilles en 1972

F - BILAN D'UTILISATION DES ELEMENTS MINERAUX PAR LA VIGNE CULTIVEE EN HYDROPONIQUE

En vue d'établir un bilan d'utilisation des éléments minéraux par la vigne nous avions la possibilité de nous adresser soit à la moyenne de résultats soit à une solution nutritive particulière. Nous avons retenu cette dernière possibilité pour simplifier les calculs et aussi parce qu'elle nous a permis de choisir une solution nutritive sur laquelle la vigne avait poussé de manière vigoureuse et équilibrée en produisant une grande quantité de matière sèche : il s'agit de la solution 5 - Calcium en 1972.

Rappelons ici que la solution nutritive (40 litres) était changée régulièrement chaque semaine mais en vue de déterminer l'évolution de cette solution nous l'avons laissée en circuit une seule fois pendant une durée de 15 jours et à la fin de cette période la solution restante a été mesurée et analysée.

Les calculs que nous nous proposons de faire ne sont qu'approximatifs puisque nous sommes obligé d'extrapoler à partir des courbes de croissance obtenues en 1972 (figure 8). Ces courbes de croissance nous montrent que la totalité de la matière sèche obtenue correspond à environ 100 jours de croissance à vitesse maximum. Pendant ces 100 jours nous avons changé les solutions nutritives 12 fois c'est-à-dire fourni à la plante 12 fois les quantités de sels de départ.

Pour la solution 5 - Calcium (comme pour les autres d'ailleurs) nous connaissons d'une part la quantité totale d'éléments minéraux qui ont pénétré dans le végétal (tableau 30, rangée 1) et ont été retrouvés analytiquement dans la matière sèche de celui-ci, par le calcul nous pouvons donc déterminer la quantité d'éléments absorbés en 15 jours de croissance (15/100) et d'autre part la quantité totale d'éléments minéraux que nous avons mis à la disposition de la plante tout au long de sa croissance (rangée 3) ainsi que pendant les 15 jours où la solution a été analytiquement suivie (rangée 4).

A partir de la quantité d'éléments minéraux fournis au début de la période de 15 jours et de la quantité d'éléments minéraux absorbés par

éléments minéraux	N	S	P	K	Ca	Mg	total
quantité d'éléments absorbés* pour les 218g de M. S. synthétisée	3,96	0,46	0,50	3,12	4,37	0,46	12,87
quantité d'éléments absorbés pendant 15 jours de croissance	0,59	0,07	0,08	0,47	0,66	0,07	1,94
quantité d'éléments mis à la disposition des plantes pendant 100 jours	55,68	64,03	41,38	78,77	121,92	24,00	385,78
quantité d'éléments mis à la disposition des plantes pendant 15 jours	4,64	5,34	3,45	6,56	10,16	2,00	32,15
coefficient d'utilisation des éléments minéraux (en %)	12,7	1,3	2,3	7,2	6,5	3,5	5,6
quantité d'éléments ayant quitté la solution nutritive en 15 jours (détermination analytique)	0,59	1,00	3,08	2,66	3,71	0,43	11,47
perte en élément minéraux par précipitation ou autre accident (autre que l'absorption par la vigne)	-	0,93	3,00	2,19	3,50	0,36	9,98

* déterminée à partir de la teneur moyenne pondérée des différentes parties du végétal

Tableau 30 : Bilan d'utilisation des éléments minéraux par la vigne cultivée sur la solution 5 - Calcium (en g).

la vigne en 15 jours il est possible de déterminer le coefficient d'utilisation des éléments minéraux (rangée 5), il apparaît que le pourcentage d'utilisation est toujours très faible, il atteint au maximum 12,7% pour l'azote et seulement 1,3% pour le soufre le coefficient d'utilisation moyen étant de 5,6%.

L'analyse de la solution nutritive après qu'elle ait servi à l'alimentation de la vigne pendant 15 jours (rangée 6) nous montre pourtant qu'une quantité relativement grande d'éléments minéraux n'est plus dans la solution. Cette quantité est sans aucune mesure avec l'absorption par la plante et la dernière rangée du tableau 30 nous fournit les valeurs concernant cette perte qui touche les éléments minéraux de manière très inégale et qui ne laisse en particulier presque plus de phosphore dans la solution. On peut admettre que cette disparition d'éléments minéraux tient essentiellement à des précipitations.

Sur le plan de l'évolution des concentrations en éléments minéraux au bout de 15 jours de culture les résultats sont fournis dans le tableau 31. Globalement il apparaît que la quantité totale d'éléments minéraux qui se retrouve dans les solutions au bout de 15 jours est passée de 0,8g/l à 1,8g/l, c'est-à-dire qu'on assiste à une concentration très importante. De plus cette concentration ne touche pas tous les éléments minéraux de la même manière puisque pour le phosphore et le phosphore seulement,il s'agit d'une dilution (voir chapitre concernant l'évolution de la composition minérale des solutions nutritives) donc malgré les précipitations dont nous avons vu qu'elles touchent 11,47g d'éléments minéraux en 15 jours c'est-à-dire environ 30% de la fourniture initiale, l'augmentation de concentration de la solution nutritive reste très marquée . Si on exprime cette concentration en sels totaux et non plus en éléments minéraux (tableau 32) il apparaît que pour une concentration de départ de 1,8g/l on obtient au bout de 15 jours une concentration de 4,3g/l.

CONCLUSION

Nous venons de montrer les limites de la méthode des cultures

	éléments minéraux (en gramme)						
	N	S	P	K	Ca	Mg	total
quantité d'éléments minéraux non utilisés par la plante après 15 jours de culture (g/40l)	4,05	5,27	3,37	6,09	9,5	1,93	30,21
concentration des éléments minéraux dans la solution de départ (40 litres de solution - en g/l)	0,116	0,133	0,086	0,164	0,252	0,050	0,801
concentration des éléments minéraux dans la solution après 15 jours de culture (en g/l)	0,40	0,40	0,03	0,37	0,60	0,13	1,8

Tableau 31 : évolution de la concentration des éléments minéraux dans la solution 5 - Calcium

	solution fraîche	solution utilisée (après 15 jours)
concentration saline totale	72g/40 l = 1,8g/l	47g/11 l = 4,3g/l

Tableau 32 : concentration saline totale de la solution fraîche et utilisée . (solution 5 - calcium)

hydroponiques à solution récupérée pour l'étude de la nutrition minérale ; nous sommes obligés d'admettre que les solutions nutritives que nous avons utilisées se sont non seulement concentrées mais que leurs équilibres ioniques se sont modifiés au cours de leur utilisation. Notre apport dans ce domaine tient au fait que nous avons pu constater et mesurer cette évolution. Cependant il faut tempérer le caractère négatif des conclusions que nous venons de tirer en rappelant que les solutions nutritives ont été changées toutes les semaines alors que les mesures qui viennent de nous servir ont été réalisées en laissant exceptionnellement en circuit la même solution pendant 15 jours de manière à accentuer les résultats et à faciliter leur mesure. Nous ne devons donc pas nous étonner d'avoir mis en évidence des phénomènes quantitativement très importants.

TROISIEME PARTIE

NUTRITION MINERALE DE LA VIGNE EN CULTURE STERILE

NUTRITION MINERALE DE LA VIGNE EN CULTURE STERILE

Notre but est de comparer la composition minérale de la vigne cultivée en hydroponique à celle cultivée stérilement in vitro sur milieu gélosé et d'étudier certains caractères de la nutrition minérale de ce type de culture.

Nous avons entrepris une série d'expérimentationsen nous basant sur la méthode de culture " in vitro " mise au point par Madame GALZY (1970).

I - MATERIEL ET METHODE

Le matériel de départ est constitué par des boutures de pousses herbacées obtenues sur des baguettes de vigne forcées dans des bocaux contenant de l'eau à la température ambiante du laboratoire. Chaque bouture est composée d'un fragment de tige portant un seul noeud avec son bourgeon anticipé axillaire de la feuille.

Après stérilisation à l'hypochlorite de calcium pendant 30 minutes et rinçage à l'eau distillée stérile, le repiquage des boutures dans des tubes de culture se fait dans une boîte à gants.

Les tubes de culture sont placés en chambre climatisée dans les conditions suivantes :

- Eclairage : il est fourni par des tubes Sylvania Gro-lux de 30 Watts de puissance. La durée d'éclairement est de 16 heures. La distance entre les tubes fluorescents et le plateau support des tubes est de 40 cm.

- Température : elle est maintenue entre 20°C et 25°C.

- Humidité : les tubes étant clos, elle est toujours de 100 % à l'intérieur des tubes.

Les solutions nutritives fournies aux vignes en culture stérile sont identiques à celles utilisées précédemment en culture hydroponique

(voir composition dans lestableaux 1,2). C'est à dire qu'elles sont purement minérales. 20 ml de solution nutritive sont mis dans chaque tube à essai à la disposition de la plante.

La solution témoin retenue contient les éléments minéraux principaux de la solution de KNOP à laquelle s'ajoutent les oligoéléments, les vitamines et les sucres préconisés par GALZY (1970) et OLIVAIN (1972). La raison qui nous a fait retenir cette solution comme témoin est qu'elle est très utilisée pour les cultures stériles de vigne. La composition de cette solution est la suivante :

Solution de KNOP à la dilution 1/2	1000 ml
Solution de BERTHELOT	0,5 ml
Saccharose	15 g
Gélose	8 g
Thiamine (concentration poids/volume)	10^{-6}
Pyridoxine(concentration poids/volume)	10^{-6}
Acide nicotinique (concentration poids/volume)	10^{-6}
Panthoténate de calcium (concentration p/v)	10^{-6}
Inositol (concentration p/v)	10^{-5}
Biotine (concentration p/v)	10^{-8}
pH ajusté à 6,5	

Composition minérale en meg/l de cette solution :

N	S	P	K	Ca	Mg
5,47	1,02	1,84	2,16	4,23	1,02

Rapport A/C = 8,33/7,41 = 1,12

Produits chimiques utilisés :

$(NO_3)_2Ca.4H_2O$	500 mg/l
NO_3K	125 mg/l
$SO_4Mg.7H_2O$	125 mg/l
PO_4H_2K	125 mg/l
Total	875 mg/l

Composition de la solution de BERTHELOT :

Sulfate de manganèse	2 g
Iodure de potassium	0,5 g

Sulfate de titane	0,2 g
Sulfate de zinc	0,1 g
Sulfate de glucinium	0,1 g
Chlorure de nickel	0,05 g
Chlorure de cobalt	0,05 g
Acide borique	0,05 g
Sulfate de cuivre	0,05 g
Acide sulfurique	1 cc
Eau distillée QSP	1 litre
Fe sous forme de Fe EDTA	5 mg Fe/l de solution

Les méthodes d'analyse sont les mêmes que celles utilisées pour la culture hydroponique.

La vitesse de croissance des jeunes plants étant différente selon le milieu et les analyses réalisées pour un certain état de croissance, la durée de l'expérience a été différente pour chaque milieu :

- 123 jours pour le milieu de référence
- 138 jours pour les milieux 7 et 9
- 158 jours pour les milieux 1-2-3-4-5-6-8.

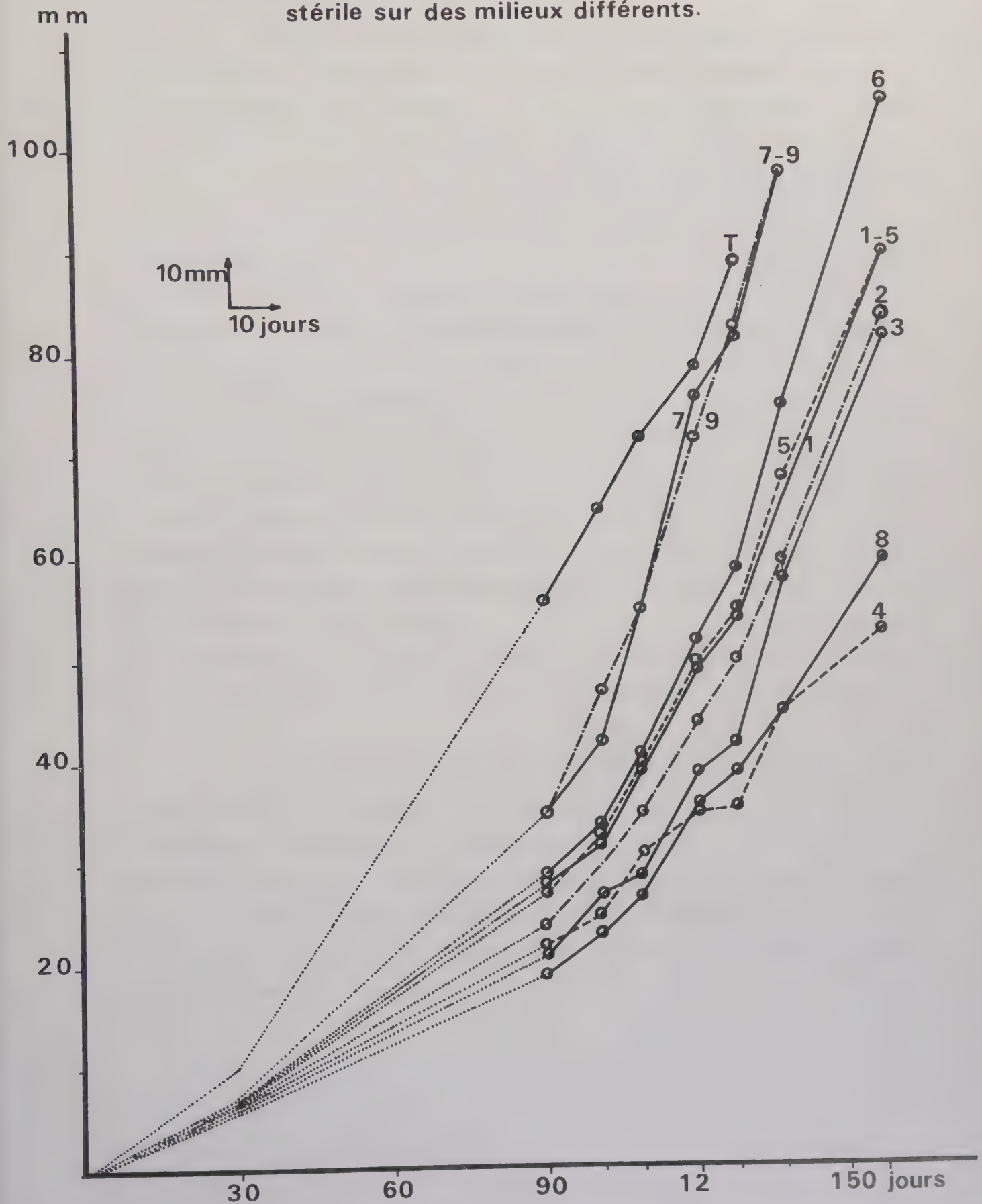
II - RESULTATS

A - ETUDE DES CARACTERES DE LA CROISSANCE

Les mesures de croissance que nous avons effectuées pour les différentes solutions nutritives, nous ont permis de tracer les courbes de la figure 24.

Au début de la culture, il apparaît une très nette différence entre le milieu témoin et les milieux expérimentaux. Il faut rappeler ici que le milieu témoin contient du sucre et des vitamines qui permettent un démarrage rapide de la croissance alors que les capacités d'autotrophie de petites boutures sur milieu minéral simple sont encore très réduites. Au bout de deux mois et demi de culture les pousses obtenues sur milieu minéral

Figure 24: Courbes de croissance de la vigne en culture stérile sur des milieux différents.



mesurent 20 à 30 mm alors qu'avec des matières organiques leur dimension est environ double.

Dans un deuxième temps, après que les premières feuilles se soient étalées, il semble que les milieux de culture minéraux deviennent très favorables à la croissance. C'est à dire que la vitesse de croissance sur ces milieux peut devenir égale ou même supérieure à celle du milieu témoin contenant du sucre et des vitamines. Au cours de cette période on voit apparaître des différences qui vont en s'accentuant entre les divers milieux minéraux. On peut noter que les milieux 6 - 7 - 9 permettent d'obtenir les vitesses de croissance les plus élevées (environ 3 à 4 mm/jour) alors que les milieux 4 et 8 ne fournissent que des vitesses de croissance beaucoup plus faibles(1,2 à 1,5 mm/jour).

Dans un troisième temps qui se situe à la fin de la culture, nous avons tenté de mesurer l'état de croissance atteint par les plantules d'après la quantité totale de matière sèche synthétisée. Le tableau 33 nous permet de constater que dans tous les cas la quantité de matière sèche contenue dans une plantule se situe entre 42 et 61 mg. Cet écart est assez faible, et il est encore artificiellement réduit par le fait que ces mesures s'échelonnent au cours du temps. Il faut noter cependant que aussi bien pour la quantité de matière sèche formée que pour la teneur de la matière fraîche en matière sèche, le témoin se trouve largement en tête.

On peut ajouter en outre qu'aucun symptôme visible de carence ou de toxicité n'est apparu sur quelque milieu que ce soit. La différence existant entre les milieux ne concernait que la vitesse de croissance. On peut donc conclure que tous ces milieux sont assez favorables à la vigne et que pour avoir une idée des éléments minéraux intervenant sur cette différenciation des vitesses de croissance, le recours à l'analyse végétale est nécessaire.

Milieux	nombre de plantules	durée de l'expérience (j)	matière fraîche de chaque plantule (mg)	poids en M. S. de chaque plantule (mg)	teneur en M. S. en % de la M. F.
1 -Azote	6	158	442,3	53	12,0
2 -Soufre	9	158	372,2	46	12,3
3 -Phosphore	4	158	390,0	50	12,8
4 -Potassium	5	158	400,0	47	11,7
5 -Calcium	15	158	453,6	60	13,3
6 -Magnesium	10	158	406,1	55	13,4
7 -Huglin	12	138	328,6	42	12,8
9 -Homès	9	138	490,0	56	11,4
Témoin	33	123	398,8	61	15,4

Tableau 33 : résultats de l'expérience en culture stérile : quantité totale de matière fraîche et de matière sèche synthétisée.

B - ETUDE DE L'UTILISATION DES ELEMENTS MINERAUX ET DE L'EAU

1 - ANALYSE CHIMIQUE DU VEGETAL ENTIER

L'analyse chimique du végétal a été réalisée sur l'ensemble des plantules. C'est à dire que les feuilles, les tiges et les racines sont mélangées et analysées. Cette analyse nous a donné les résultats suivants concernant les éléments minéraux principaux (tableau 34 et figure 25).

La teneur en azote des plantules obtenues sur tous les milieux se trouve à un niveau assez élévé, mais que l'on peut considérer comme fréquemment rencontré dans les conditions naturelles. Pourtant dans les solutions 7 (HUGLIN) et 9 (BECQUET) l'absorption de l'azote semble être favorisée (tableau 34et figure 25). Il faut noter à ce sujet que ces deux milieux ont permis d'obtenir les vitesses de croissance les plus élevées ; c'est à dire que le rapport des parties adultes sur les parties jeunes est en faveur des parties jeunes. Or, l'on sait que la teneur en azote est particulièrement élevée dans les tissus jeunes. On peut remarquer aussi que les teneurs les plus élevées en azote ont été obtenues pour les milieux 1 (azote) très riche en azote , 7 (HUGLIN) et 9 (BECQUET) ; ces deux derniers, outre l'aspect concernant la vitesse de croissance élevée, contiennent une grande quantité de potassium, élément réputé favoriser dans certains cas l'absorption de l'azote.

En ce qui concerne le soufre (tableau 34 et figure 25), les teneurs foliaires classiquement admises dans les conditions naturelles sont comprises entre 0,18 et 0,74 %. C'est à dire que les résultats que nous avons obtenus avec notre méthode qui s'éloigne beaucoup des conditions naturelles et qui n'analyse pas seulement les feuilles mais la totalité de la plante, peuvent être considérés comme peu différents des valeurs habituelles. Il faut noter cependant que selon le milieu de culture les rapports des teneurs peuvent varier de 1 à 17 et que la teneur la plus faible se trouve dans le milieu témoin qui peut être considéré comme en dehors des normes habituelles de composition des milieux de cultures pour végétaux autotrophes.

La teneur en phosphore des feuilles obtenues dans la nature est normalement supérieure à 0,22% (tableau 10 et figure 16). Dans le cas qui nous intéresse, les milieux 3 (phosphore) et 5 (calcium) atteignent ou dépassent cette norme. Dans tous les autres milieux la teneur est un peu plus faible ; elle se trouve à son plus bas niveau dans la solution témoin.

Le potassium semble être absorbé en quantité très nettement supérieure à la normale (tableau 34 , figure 25) ; la vérification n'a pas pu être entreprise en raison de la trop faible quantité de matière sèche que nous avions à notre disposition ; la mise en place d'une autre série expérimentale est nécessaire afin d'opérer cette vérification. Les plantules obtenues sur le milieu témoin ont une teneur en potassium qui se trouve dans la fourchette habituellement admise.

La teneur en calcium (tableau 34 et figure 25) est fortement dépendante de l'âge des tissus, mais nos résultats ne mettent pas en relief ce caractère. Les teneurs obtenues peuvent être considérées comme " normales ". Seules les solutions 4 (potassium) et 9 (BECQUET) fournissent des plantules contenant un peu moins de 1% de Ca. On peut remarquer cependant que la teneur tissulaire la plus élevée (2,15 %) a été obtenue avec la solution 5 (calcium), la plus riche en calcium.

Il est admis que la teneur habituelle des feuilles en Mg est voisine de 0,30 % ; des teneurs supérieures à 1% ont néanmoins été déjà exceptionnellement citées (in FREGONI). Les résultats que nous avons obtenus peuvent donc être considérés comme se trouvant dans les limites admises (tableau 34 et figure 25). Cependant, la solution 6 (magnésium) permet d'atteindre des teneurs de 1,6 % dans les tissus ; il faut remarquer à ce sujet que l'antagonisme classique K-Mg se manifeste relativement faiblement dans toutes les plantules bien que la teneur en potassium puisse être considérée comme encore très élevée.

En ce qui concerne le rapport K/Mg, nous pouvons constater (tableau 35) qu'il se trouve entre 4 et 8 dans la majorité des cas ; seule la solution 6 (magnésium) fournit un rapport beaucoup plus faible (1,6)

Milieux	éléments minéraux						total
	N	S	P	K	Ca	Mg	
1	2,95	0,17	0,19	4,21	1,66	0,54	9,72
2	2,66	0,63	0,14	4,03	1,29	0,81	9,56
3	2,55	—	0,27	4,09	1,00	0,83	8,74 *
4	2,72	—	0,20	5,62	0,93	0,51	9,98 *
5	2,58	1,03	0,22	3,27	2,15	0,68	9,93
6	2,63	0,57	0,19	2,70	1,30	1,69	9,08
7	3,57	0,49	0,20	3,77	1,16	0,62	9,81
9	3,01	0,75	0,19	4,57	0,90	0,57	9,99
T	2,29	0,06	0,13	1,90	1,68	0,34	6,40
moyenne	2,80	0,53	0,19	3,80	1,34	0,73	9,39

* : sans compter le soufre.

Tableau 34 : composition minérale de la vigne cultivée en culture stérile sur des milieux de composition différente (exprimée en g sur 100g de matière végétale sèche).

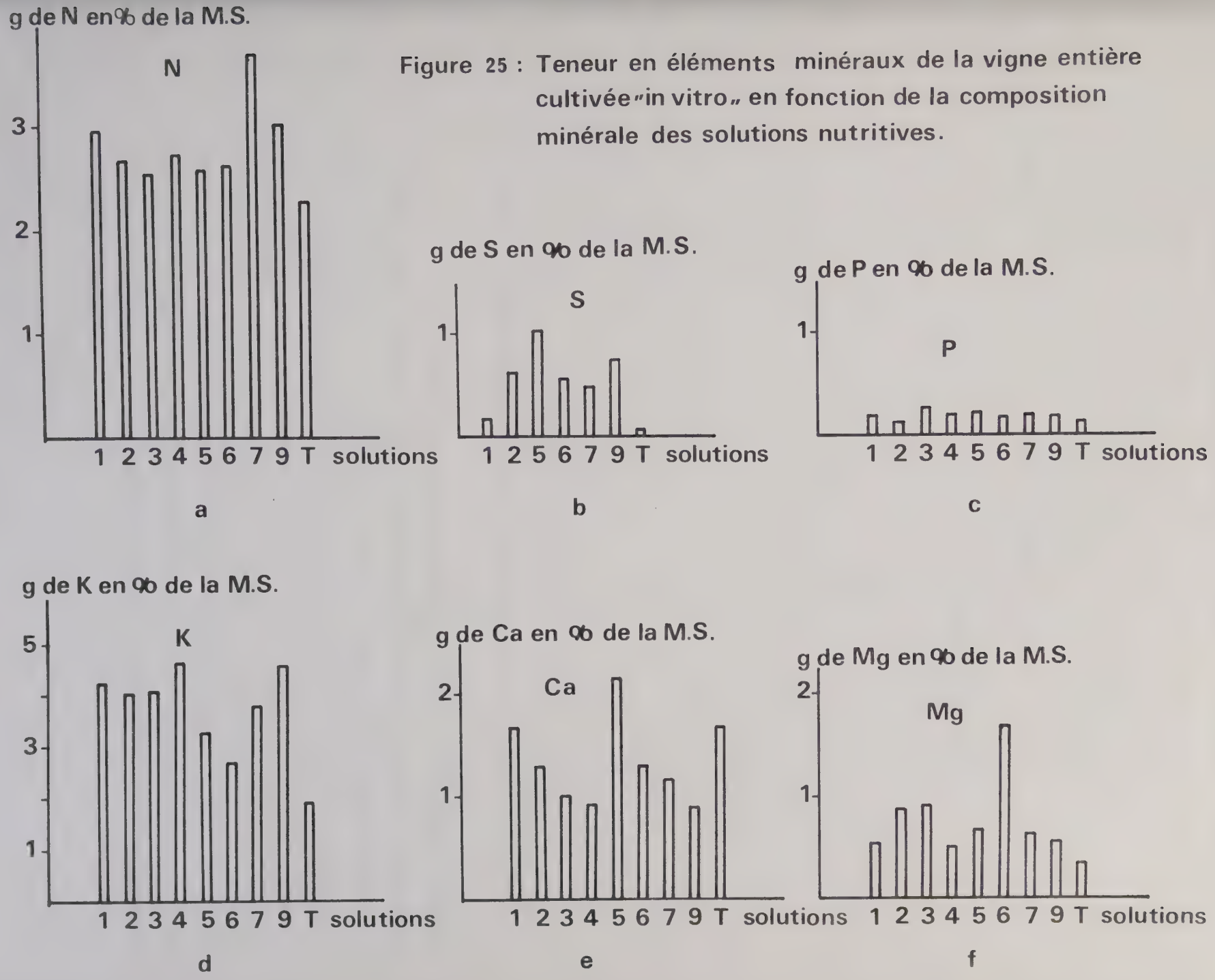


Figure 25 : Teneur en éléments minéraux de la vigne entière cultivée "in vitro" en fonction de la composition minérale des solutions nutritives.

dû à une teneur en magnésium très élevée et la solution 4 (potassium) un rapport beaucoup plus fort dû à une teneur en potassium très élevée. Rappelons que dans la pratique du diagnostic foliaire on admet que l'alimentation est normale quand ce rapport est compris entre 4 et 7 ; mais que dans certains cas il peut se trouver entre 1 et 15 sans que des symptômes de carence ou de toxicité n'apparaissent.

Milieux	Rapport K/Mg
1	7,8
2	5,0
3	5,0
4	11,1
5	4,8
6	1,6
7	6,1
9	8,1
T	5,6

Tableau 35 : Rapport K/Mg dans la vigne cultivée en culture stérile.

En conclusion, il apparaît que la solution témoin qui fournit d'ailleurs les teneurs les plus faibles pour l'azote, le soufre, le phosphore, le potassium et le magnésium permet d'obtenir des végétaux dont la teneur totale dans les 6 éléments minéraux analysés est la plus basse (6,4 %). Dans le chapitre relatif à la croissance, nous avons cependant noté que cette solution fournissait la quantité de matière sèche la plus élevée. Ces deux résultats ne sont pas contradictoires, en effet cette solution très " organique "facilite probablement l'accumulation de réserves, des glucides par exemple, qui augmentent la matière sèche et diluent les éléments minéraux.

2 - BILAN D'UTILISATION DES ELEMENTS MINERAUX

Nous nous proposons d'étudier l'absorption des éléments minéraux par la vigne in vitro. Cette technique qui met à la disposition de la plante une quantité déterminée de chacun des éléments nutritifs permet d'établir un bilan de l'utilisation de différents éléments minéraux et de savoir si chacun d'eux se concentre ou se dilue dans le milieu de culture, à mesure que la plante réalise son prélèvement.

Les résultats que nous indiquons dans le tableau 36 concernent uniquement le milieu 5 (calcium) que nous avons choisi comme milieu de référence pour cette étude, (les résultats analytiques de ce milieu étant plus proches des données habituelles) . Les valeurs concernant les autres milieux ne sont pas fournies car l'expérimentation réalisée est trop sommaire pour permettre des comparaisons fines valables. Néanmoins, nous avons voulu montrer le parti qu'il était possible de tirer d' une démarche de ce type et fournir des résultats indicatifs pour une solution de référence.

L'expérience qui conduit aux résultats fournis dans le tableau 36 a été effectuée sur 15 plantules. Les analyses ont été réalisées quand les plantules mesuraient 10 cm de long environ et avaient consommé de l'ordre de 50 % du volume du milieu nutritif mis à leur disposition. Chaque tube contenant 20 cc de milieu, la quantité totale fournie est de 300cc et la quantité de matière sèche formée a été au total pour les quinze tubes de 905 mg.

Les résultats numériques (tableau 36) montrent que , pour l'azote et le potassium, le coefficient d'utilisation est supérieur à 50 %. C'est-à-dire que les plantules ont consommé ces deux éléments plus rapidement que l'eau, donc leur concentration a tendance à diminuer dans le milieu de culture à mesure que la plante opère ses prélèvements.

Pour tous les autres éléments, les quantités absorbées par le végétal sont inférieures, voire très fortement inférieures à 50 %. C'est-à-dire que leur concentration a tendance à augmenter dans le milieu de culture.

éléments minéraux	N	S	P	K	Ca	Mg	total
quantité d'éléments absorbés pour 905 mg de matière sèche (mg)	23,35	9,32	1,95	29,59	19,46	6,11	89,78
quantité d'éléments mis à la disposition des plantules (en mg pour 300 ml de solution nutritive)	34,8	39,9	25,8	49,2	75,6	15,0	240,30
coefficient d'utilisation des éléments minéraux (en %)	67,0	23,3	7,5	60,0	25,7	40,7	37,4
évolution des concentrations au cours de la culture	dilution légère	concentration	très forte concentration	dilution légère	concentration	concentration légère	concentration

Tableau 36 : rapport de la quantité fournie sur la quantité absorbée pour chacun des éléments minéraux : coefficient d'utilisation des éléments minéraux - utilisation volumétrique du milieu 50 %.

Il est remarquable de constater que la plante n'utilise que 7,5% du phosphore qu'on lui propose. Ceci va dans le sens d'une très faible utilisation de phosphore par la vigne, et l'on sait que sous forme d'engrais l'action du phosphore sur la vigne est extrêmement difficile à mettre en évidence.

Il pourrait être intéressant d'établir le bilan d'utilisation des éléments minéraux sur toutes les solutions que nous avons expérimentées puis d'essayer de calculer un milieu qui corresponde de manière très précise aux besoins de la plante, c'est-à-dire dont la composition et en même temps les équilibres ioniques et le pH resteraient constants de bout en bout de la culture. Une étude de ce type semble relativement simple à mettre sur pied et du fait de la constance des conditions, elle pourrait se révéler riche d'enseignements. Elle serait comparable à une culture hydroponique en solution coulante dont on connaît les difficultés de réalisation pratique et elle aurait l'avantage par rapport à cette méthode d'éliminer les sources de variation dues à la présence de microorganismes.

3 - EAU : COEFFICIENT DE TRANSPIRATION

Le tableau 37 indique les valeurs du coefficient de transpiration obtenu en culture stérile, c'est-à-dire en tube de culture,pour deux espèces : la vigne et le liseron. Les conditions expérimentales ont été différentes pour ces deux espèces. En effet la durée de la culture pour la vigne a été de 3 mois et la moitié seulement du milieu de culture a été consommée, c'est-à-dire que nous sommes en présence d'une croissance très lente par rapport à ce que l'on obtient généralement avec ce type de culture.

Pour le liseron, l'expérience a duré jusqu'à déshydration totale du milieu de culture entraînant la mort de la plante, c'est-à-dire que les conditions alimentaires ont été très défavorables à la croissance vers la fin de la culture.

Le coefficient de transpiration obtenu a été de 152 pour la vigne et 266 pour le liseron ; dans les deux cas, les conditions expérimen-

espèces	quantité de milieu de départ	quantité de milieu après 3 mois	quantité de MS. formée	coefficient de transpiration
vigne en culture stérile (3 mois)	100 cc	49 cc	335 mg	152
liseron en culture stérile (5 mois)	100 cc	0 cc	376 mg	266

Tableau 37: coefficient de transpiration de la vigne et du liseron cultivés en culture stérile (in vitro).

tales n'ont cependant pas été favorables à la croissance, c'est-à-dire que les coefficients obtenus sont des chiffres maximums et qu'avec des conditions plus favorables, on peut certainement les diminuer dans une très forte mesure.

Rappelons que, dans les conditions naturelles, le coefficient de transpiration de la vigne se situerait entre 500 et 750 (*) (BRANAS, 1974), c'est-à-dire que la méthode de culture utilisée ici permet de faire une économie d'eau très importante.

On peut se demander à quoi tient cette faible exigence des cultures stériles vis-à-vis de l'eau. Deux hypothèses peuvent être proposées:

- L'eau serait transpirée en grande quantité par la plante mais elle se condenserait dans le tube et retournerait dans le milieu de culture, c'est-à-dire qu'elle serait recyclée et pourrait ainsi être utilisée plusieurs fois. Cette hypothèse nous paraît en contradiction avec le fait que l'on voit peu de condensation sur les parois des tubes et pratiquement jamais d'eau à la surface du milieu de culture. Rappelons que l'absorption de l'eau par un milieu gélosé est à peu près impossible. Cette hypothèse mérite néanmoins d'être vérifiée (voir en annexe un protocole expérimental destiné à cette vérification).

- L'eau ne serait transpirée qu'en très faible quantité du fait de l'humidité très élevée se trouvant dans l'atmosphère du tube, c'est-à-dire que ces conditions expérimentales permettraient d'augmenter très fortement le rendement de l'eau et qu'une grande consommation d'eau par le végétal n'est pas nécessairement reliée à une synthèse très active.

Classiquement, on admet qu'il existe une certaine proportionnalité entre la consommation d'eau et la synthèse de matière sèche. On sait aussi qu'une ETP très élevée peut diminuer le rendement de l'eau, c'est-à-dire augmenter le coefficient de transpiration. Plusieurs travaux ont déjà montré que la conception reliant directement la consommation d'eau et le rendement était fausse (PERCEVAUX, 1963) ; notre méthode permet de confirmer cette façon de voir puisqu'en diminuant la demande climatique, nous constatons que le rendement de l'eau augmente.

(*) Des expériences en cours actuellement (Mme S. MERIAUX, communication orale) aboutiraient à proposer des cœfficients de transpiration beaucoup plus bas compris entre 230 et 350.

C - CONCLUSION

Il est très difficile de comparer les résultats de la culture stérile avec les résultats de la culture hydroponique. Bien que la composition minérale des milieux soit la même, les conditions dans lesquelles les plantes se trouvent sont différentes. La culture hydroponique est plus proche de la culture naturelle, le développement et la croissance des plantes se faisant à l'air libre. Le sable utilisé comme support assure l'aération des racines, la solution nutritive est abondamment aérée au cours de sa circulation. L'absorption des éléments minéraux a lieu dans des conditions qui se rapprochent des conditions naturelles. Cela assure, dans une large gamme de concentrations en éléments minéraux de la solution nutritive la croissance et le développement de la vigne.

En culture stérile, le développement des racines se fait dans un milieu nutritif servant en même temps de support aux plantules. Dans ce milieu l'aération des racines ne peut pas être assurée de manière suffisante. L'humidité dans les tubes est toujours de l'ordre de 100 %. Cela aussi ralentit l'absorption de l'eau par les racines, puisque la transpiration par les feuilles est toujours minimale.

L'atmosphère des tubes à essai est très favorable à l'ouverture des stomates c'est-à-dire qu'il est possible d'avoir à la fois une photosynthèse active et une transpiration très faible du fait de l'humidité élevée règnant à l'intérieur des tubes. L'un des paramètres qui à l'heure actuelle nous paraît le plus difficile à contrôler est la teneur en CO_2 de l'atmosphère du tube. Dans ce domaine il ne faut pas écarter l'intervention des glucides contenus dans le milieu témoin par l'intermédiaire du CO_2 provenant de la respiration.

Cependant, sur le plan scientifique, la culture stérile offre quelques avantages particuliers : la durée de l'expérience est de l'ordre de 3 à 4 mois, la reproduction de la matière végétale est fréquente, la répétition de l'expérience est très facile en raison de la présence du matériel végétal tout au long de l'année.

Un caractère qui peut paraître inattendu et remarquable, se

trouve dans l'excellent rendement sur le plan de la nutrition minérale de ce type de culture. Notre étude a en effet montré que la moitié environ des éléments minéraux avait été " organisée " et que le rendement de l'eau était très élevé. Etant donné que notre expérimentation s'est proposée de réaliser des mesures dans des conditions expérimentales qui pourraient très certainement être améliorées, le rendement de l'eau, par exemple, a été mesuré sur une culture "paresseuse", c'est-à-dire qu'il nous semble possible d'obtenir des coefficients de transpiration beaucoup plus bas et très certainement inférieurs à 100. Pour ce qui est du rendement des éléments minéraux, la réalisation d'un milieu de culture équilibré dont la composition chimique serait stable de bout en bout de la culture, pourrait très probablement accroître le pourcentage d'utilisation des éléments minéraux et augmenter notablement la durée de la croissance à vitesse maximum.

CONCLUSION GENERALE ET PROPOSITION D'UNE SOLUTION NUTRITIVE

CONCLUSION GENERALE ET PROPOSITION D'UNE SOLUTION NUTRITIVE

Les techniques utilisées pour réaliser le présent travail nous ont permis de suivre la destinée des éléments minéraux dans le milieu de culture et dans la plante en relation avec les caractères de la croissance de celle-ci.

Pour ce qui est des solutions nutritives nous avons constaté qu' elles subissaient une transformation très importante sous l'effet des prélèvements dû à la plante et des précipitations.

Ces transformations dont nous devons tenir compte dans nos conclusions amènent des modifications dans deux domaines : celui des rapports entre les éléments et celui de la concentration saline totale des solutions.

Pour ce qui est de la croissance des plantes nous sommes obligés de constater que quel que soit le milieu de départ et qu'elle que soit sa transformation au cours de la culture la croissance de la vigne se réalise toujours de manière très active avec des variations entre le milieu de culture qui ne revêtent jamais une importance bien grande.

Les difficultés de mise en évidence de relations plus claires entre la croissance et le milieu de culture fourni tiennent à notre avis pour une part aux modifications du milieu de culture au cours de la croissance c'est-à-dire des prélèvements réalisés dans le milieu par la plante, mais aussi au fait que l'absorption des éléments minéraux dépend du métabolisme général du végétal qui en rapport avec d'autres phénomènes physiologiques (dormance, possibilité d'utiliser les réserves, caractères de croissance en relation avec le photopériodisme, etc...) se trouve en mesure de prélever, activement, tel ou tel élément dans le milieu de culture.

Les solutions nutritives adaptées à la vigne qui nous sont fournies par la bibliographie ont été obtenues sur des bases peu claires. Notre travail a montré que la vigne pousse activement sur ces solutions mais aussi que ces solutions se modifient très rapidement.

A partir de nos résultats il est possible de proposer une solution qui ne se modifierait pas sous l'effet des prélèvements dû à la plante. En faisant intervenir dans le calcul non seulement les rapports entre les élé-

ments nutritifs mais aussi le coefficient de transpiration on peut imaginer une solution dont la composition resterait identique pendant toute la durée de son utilisation ; c'est cette idée que nous souhaitons reprendre pour la détailler maintenant.

PROPOSITION D'UNE SOLUTION NUTRITIVE

A partir des analyses que nous avons réalisées aussi bien sur la plante que sur la solution minérale il nous paraît possible de proposer une solution nutritive sur la base de sa non modification par le prélèvement de la plante. En effet tout au long de notre étude nous nous sommes heurtésau problème de la modification des solutions nutritives en cours de leur utilisation sous le double aspect de leurs équilibres ioniques et de leur concentration globale.

Etant donné les bons résultats que nous avons obtenus quant'à la croissance nous devons admettre une très grande plasticité du végétal vis-à-vis de la solution qu'on lui fournit. Néanmoins il nous paraît raisonnable de proposer au végétal une solution dans laquelle il trouverait les éléments qui lui sont nécessaires et dans la proportion où il les prélève. Ayant analysé toutes les parties du végétal (tableau 28) et connaissant les quantités relatives de la matière sèche (tableaux 7 et 8) constituant ces différentes parties il nous est possible de déterminer les exportations totales réalisées par la plante et de proposer une solution nutritive (tableaux 39 à 41) correspondant de manière très précise à ces exportations (tableau 38, dernière rangée).

Reste le problème de la dilution de cette solution c'est-à-dire du choix du rapport entre l'eau et les éléments minéraux, si l'on désire que la concentration de la solution nutritive reste stable tout au long de son utilisation, il convient de se référer d'une part au coefficient de transpiration qui relie la quantité de la matière sèche à la quantité d'eau utilisée pour cette synthèse et d'autre part à la concentration en éléments minéraux de la matière sèche. Admettons que le coefficient de transpiration soit de l'ordre de 600 et que la teneur en éléments minéraux de la matière sèche soit d'environ 6% (tableau 38) la teneur totale en éléments minéraux d'une solution dont la

	éléments minéraux (g pour 100g de M.S)						
	N	S	P	K	Ca	Mg	total
teneur moyenne des feuilles	3,10	0,26	0,26	1,47	1,82	0,30	7,21
teneur moyenne des sarments verts	1,60	0,13	0,17	1,21	1,51	0,20	4,82
teneur moyenne des sarments aoûtés	1,32	0,12	0,12	1,87	0,72	0,13	4,28
teneur moyenne des racines	1,80	0,43	0,23	2,75	1,67	0,21	7,09
teneur moyenne pondérée en fonction de la quantité de M.S.	2,28	0,20	0,20	1,46	1,57	0,25	5,96

Tableau 38 : calcul de la quantité d'éléments minéraux (dernière rangée) entrant dans la composition de 100 grammes de vigne (plante entière de poids sec de 100 grammes)

	éléments minéraux (en mg/l)						
	N	S	P	K	Ca	Mg	total
concentration des éléments minéraux dans la solution nutritive (en mg/l)	38,0	3,5	3,5	24,3	26,2	3,5	99,0

Tableau 39 : proposition des quantités (en mg/l) d'éléments minéraux à apporter dans un litre de solution nutritive pour qu'elle reste constante au cours de son utilisation par la vigne

composition chimique ne sera pratiquement pas modifiée par l'absorption de la vigne sera voisine de 0,1 pour mille (tableau 39).

Cette solution n'a pas encore été expérimentée, sa concentration en particulier nous paraît être très faible eu égard aux concentrations généralement admises. L'expérimentation établira donc des comparaisons avec des solutions plus concentrées mais il est bien évident que ces solutions plus concentrées se concentreront de plus en plus à mesure de leur utilisation. Il serait possible dans ce cas de rajouter de l'eau pure pour ramener la concentration à sa valeur optimum, en sachant que les rapports entre éléments minéraux ne seraient pratiquement jamais perturbés. Cette solution a été établie pour des vignes sans fruits ; il est probable qu'elle soit légèrement modifiée si une récolte se développait en même temps que l'appareil végétatif.

Il est bien évident aussi que plus le coefficient de transpiration sera bas plus la concentration de la solution nutritive proposée devra être élevée. Pour un coefficient de transpiration de 100 (cas des cultures stériles) la concentration de la solution nutritive devra être 6 fois plus élevée que pour le coefficient de transpiration de 600 qui a servi de base à nos calculs.

En ce qui concerne les cultures stériles la solution proposée pourra contenir les éléments nutritifs soit dans les mêmes proportions que celles que nous venons de déterminer pour les cultures hydroponiques, soit dans des proportions propres aux cultures stériles en tenant compte des résultats analytiques fournis par ces cultures et présentés dans les tableaux 34 et 37.

	éléments minéraux (en meg/l)						
	N	S	P	K	Ca	Mg	total
concentration ionique (en meg) rapport A/C = 3,27/2,22 = 1,47	2,70	0,22	0,35	0,62	1,31	0,29	5,49

Tableau 40 : proposition des quantités d'éléments (en meg/l) à apporter dans un litre de solution nutritive pour qu'elle reste constante

sels à utiliser	éléments minéraux (en meg/l)						quantité de sels à utiliser (en mg/l)
	N	S	P	K	Ca	Mg	
NH_4NO_3	0,82						32,8
$Ca(NO_3)_2,4H_2O$	1,31				1,31		154,58
$MgSO_4,7H_2O$		0,22				0,22	27,06
$Mg(NO_3)_2,6H_2O$	0,07					0,07	8,96
KH_2PO_4			0,35	0,12			15,86
KNO_3	0,50			0,50			50,50
total	2,70	0,22	0,35	0,62	1,31	0,29	289,76

Tableau 41 : sels à utiliser pour la composition ionique de la solution nutritive pour qu'elle reste constante

ANNEXE

ANNEXE

PRODUITS CHIMIQUES UTILISES POUR LA REALISATION DES SOLUTIONS NUTRITIVES

Le mélange des produits chimiques doit suivre un ordre bien déterminé pour empêcher la production de composés insolubles et une éventuelle précipitation.

D'abord , on dissout les produits qui ont un caractère acide, tels que les acides, les sulfates et les nitrates , puis les produits qui ont un caractère basique comme l'hydroxyde de potassium, le phosphate biammoniacal et le phosphate bipotassique.

A cause de la faible solubilité du phosphate monocalcique, la solution mère de ce produit est préparée 5 fois plus concentrée tandis que les autres solutions mères sont faites 20 fois plus concentrées que les solutions mises à la disposition des plantes.

Les tableaux suivants nous donnent les produits chimiques utilisés et leur quantité (sans compter l'eau de cristallisation) pour la composition de chaque solution nutritive.

Tableau 1 : Produits chimiques utilisés pour la composition minérale de la solution 1 - Azote.

Produits chimiques	Poids en mg de produit pur et anhydre à utiliser pour un litre de solution
$(NO_3)_2 Ca, 4 H_2O$	574
NO_3K	606
PO_4H_2K	135,9
$SO_4Mg, 7 H_2O$	300
$(NO_3)_2Mg, 6 H_2O$	144
PO_4H_3	65,4
pH de départ : 6	Total : 1825,3 mg/l

Tableau 2 : Produits chimiques utilisés pour la composition minérale de la solution 2 - Soufre.

Produits chimiques	Poids en mg de produit pur et anhydre à utiliser pour un litre de solution
$SO_4Mg, 7 H_2O$	420
$(PO_4H_2)_2 Ca, H_2O$	66,3
$(NO_3)_2 Ca, 4H_2O$	434,6
SO_4K_2	609
SO_4H_2	49
pH de départ : 6,1	Total : 1579,9mg/l

Tableau 3 : Produits chimiques utilisés pour la composition minérale de la solution 3 - Phosphore.

Produits chimiques	Poids en mg de produit pur et anhydre à utiliser pour un litre de solution
$(PO_4H_2)_2 Ca, H_2O$	273
$(NO_3)_2 Mg, 6 H_2O$	111
$SO_4Mg, 7H_2O$	330
$K H_2PO_4$	362,4
$K NO_3$	353,5
KOH	68,3
pH de départ : 5,8	Total : 1498,2mg/l

Tableau 4 : Produits chimiques utilisés pour la composition minérale de la solution 4 - Potassium

Produits chimiques	Poids en mg de produit pur et anhydre à utiliser pour un litre de solution
$(NO_3)_2 Ca, 4 H_2O$	344,4
$SO_4 Mg, 7 H_2O$	252,0
PO_4H_2K	136,0
SO_4K_2	356,7
PO_4HK_2	307,4
NO_3K	414,1
pH de départ : 5,9	Total : 1810,6 mg/l

Tableau 5 : Produits chimiques utilisés pour la composition minérale de la solution 5 - Calcium.

Produits chimiques	Poids en mg de produit pur et anhydre à utiliser pour un litre de solution
$SO_4Mg, 7 H_2O$	252
$(NO_3)_2 Ca, 4 H_2O$	681
PO_4H_2K	376
SO_4K_2	122
H_2SO_4	132,0
$CaCl_2$	237,5
pH de départ : 5,9	Total : 1800,5 mg/l

Tableau 6 : Produits chimiques utilisés pour la composition minérale de la solution 6 - Magnésium.

Produits chimiques	Poids en mg de produit pur et anhydre à utiliser pour un litre de solution
$SO_4Mg, 7 H_2O$	498
$(NO_3)_2 Ca, 4 H_2O$	344,4
PO_4H_2K	376,0
$(NO_3)_2 Mg, 6 H_2O$	318,2
K Cl	105,0
pH de départ : 5,8	Total : 1641,6 mg/l

Tableau 7 : Produits chimiques utilisés pour la composition minérale de la solution 7 - HUGLIN.

Produits chimiques	Poids en mg de produit pur et anhydre à utiliser pour un litre de solution
$SO_4Mg, 7 H_2O$	301,0
SO_4K_2	319,3
$(NO_3)_2 Ca, 4 H_2O$	426,4
NO_3K	242,4
NO_3H	93,9
PO_4HK_2	161,0
$PO_4H(NH_4)_2$	122,0
ph de départ : 5,8	Total : 1666,0mg/l

Tableau 8 : Produits chimiques utilisés pour la composition minérale de la solution 8 - HOMES.

Produits chimiques	Poids en mg de produit pur et anhydre à utiliser pour un litre de solution
$(NO_3)_2 Mg, 6 H_2O$	466,2
$(NO_3)_2 Ca, 4 H_2O$	689,0
SO_4K_2	435,0
PO_4H_2K	256,7
$PO_4H_2NH_4$	42,1
pH de départ : 5,8	Total : 1889,0mg/l

Tableau 9 : Produits chimiques utilisés pour la composition minérale de la solution 9 - BECQUET.

Produits chimiques	Poids en mg de produit pur et anhydre à utiliser pour un litre de solution
$SO_4Mg, 7 H_2O$	301
NO_3K	800
H_2SO_4	180
$PO_4H(NO_4)_2$	133
Ca^{++} dans l'eau de la ville	250
pH de départ : 5,8	Total : 1664,0 mg/l

MESURE DU COEFFICIENT DE TRANSPIRATION DE LA VIGNE CULTIVEE IN VITRO

Protocole expérimental :

Principe de la méthode : Il consiste à réaliser un système permettant de récupérer l'eau transpirée par la plante cultivée in vitro.

Schémas de la réalisation : deux variantes nous paraissent pouvoir être retenues et devraient conduire toutes les deux aux résultats recherchés.

- la première utilise deux tubes dont le plus petit est introduit dans l'autre et percé au fond pour permettre le passage de la bouture. Il est modelé de manière à assurer la récupération de l'eau de transpiration (figure 1).

- la deuxième méthode proposée utilise un tube dans lequel est introduite une rondelle en caoutchouc souple fabriquée conformément à la figure 2 pour assurer l'étanchéité et résistant à l'autoclavage (120°C). Cette dernière exigence n'est pas obligatoire, la stérilisation à l'hypochlorite étant possible. La rondelle est destinée à récupérer l'eau de transpiration.

La durée à prévoir pour l'expérience est de 3 à 4 mois.

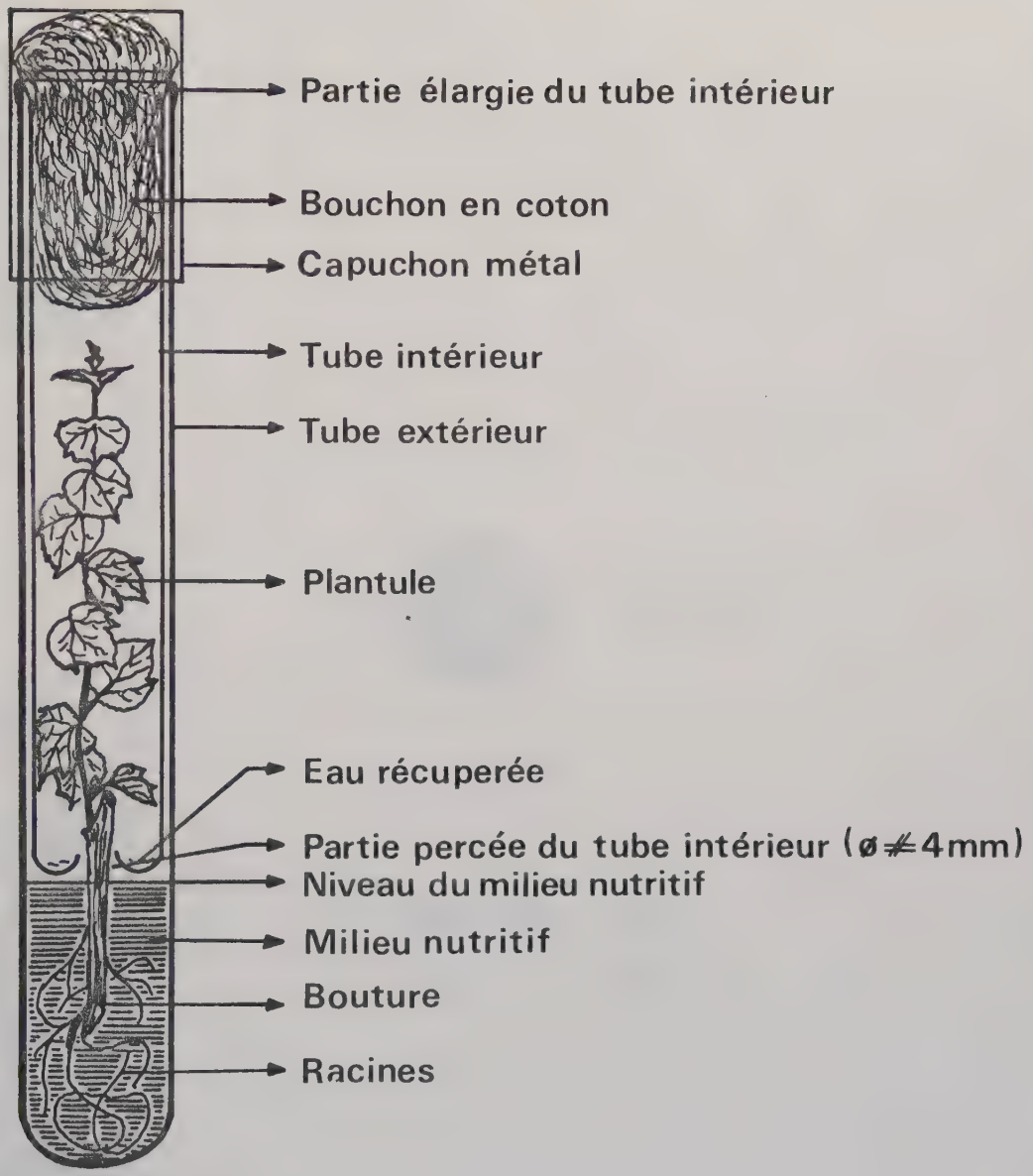


Figure 1 : Schéma d'un tube de culture destiné à récupérer l'eau transpirée par la plantule.

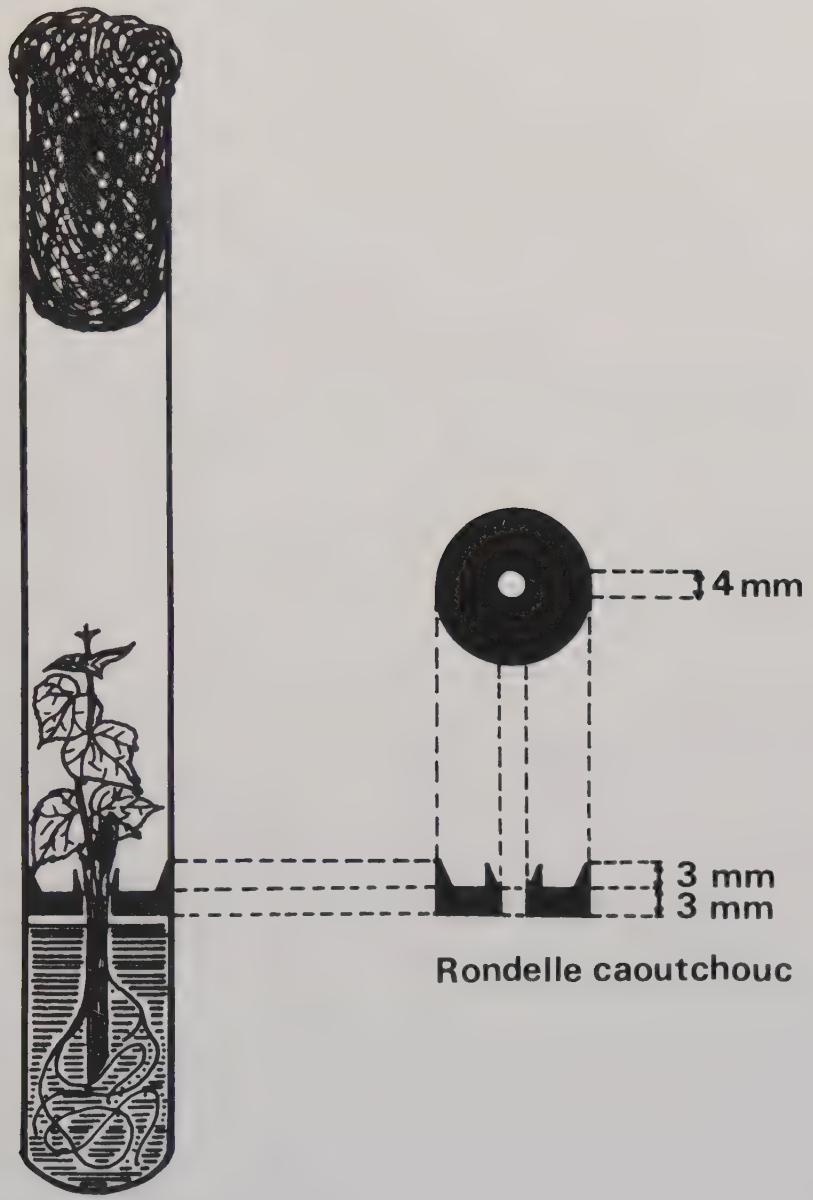


Figure 2 : Schéma d'un tube de culture déstiné à récupérer l'eau transpirée par la plantule.

B I B L I O G R A P H I E

ALEXANDER Mc. E. D., WOODHAM R. C. - Chemical composition of leaf tissues of sultana vines grown in nutrient solutions deficient in macroelements. Vitis, 9, 207-217, 1970.

BEATTIE J. M., FORSHEY G. G. - A survey of the nutrient element status of Concord Grapes in Ohio. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 64, 1954.

BECQUET M. - Culture hydroponique de la Vigne, mémoire I. B. A. N. A. 57 pages, 1968.

BERGMANN E.L., KENWORTHY A. L., BASS S. T., BENNE E. J. - A comparison between petiole and stem analysis of Concord Grapes. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.,71, 177-182, 1958.

BESSIS R., ECEVIT F. M. - Analyse du problème de l'obtention de raisin sur des boutures dès la première année. Connaissance de la Vigne et du Vin , 3, 223-232, 1974.

BLANC D. - Capacité d'échange des racines, équilibre cationique du végétal et nutrition azotée. C.R. Acad. agric. Fr., 53, 16, 1220-1225, 1967.

BLANC D. - Les limites d'utilisation des nitrates et la production de matière sèche. C.R. Acad. Agric. Fr., 912 - 917, 1961.

BLANC D. - Synthèse comparée d'azote organique par Dactylis glomerata L. cultivée en milieu nitrique et en milieu ammoniaco-nitrique. C.R. Acad. Sc., 256, 2692 - 2694, 1963.

BLANC D. - capacité d'échange des racines, équilibre cationique du végétal et nutrition azotée. C.R. Acad. Agric. Fr., 1220 - 1225, 1967.

BOUAT M. - La nutrition potassique de la vigne et son mode d'apport. II. Coloquio Europeo y mediterraneo, Sevilla/Espana, 255-267, 1968.

BOON Van der J. - Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation des cultures mediterranéennes. Montpellier, 145, 1964.

BOUARD J. - Recherches physiologiques sur la vigne et en particulier sur l'aoûtement des sarments. Thèse, 345 pages, 1966.

BRANAS J. - Notes sur l'alimentation minérale et la fertilisation de la vigne. Progrès agricole et viticole, 20, 189-197, 1962.

BRANAS J. - Du rougeau minéral et de la brunissure. Progrès agricole et viticole, 19, 160-162, 1962.

BRANAS J. - Sur les fumures de la vigne. Progrés agricole et viticole, 2, 22-24, 1971.

BRANAS J. - Mécanisme d'absorption des minéraux. Progrès agricole et viticole, 1, 5-10, 1971.

BRANAS J. - Rôle physiologique de K, Ca, Mg. Progrès agricole et viticole, 1, 5, 1971.

BRANAS J. - La vitesse d'investissement des minéraux. Progrès agricole et viticole, 1, 5, 1971.

BRANAS J. - La teneur en éléments minéraux de la vigne. Progrès agricole et viticole, 1, 4-5, 1971.

BRANAS J. - Viticulture, imprimerie Déhan, Montpellier, 990 pages, 1974.

BRECHBUHLER Ch., DIETRICH J.V., LEVY J.F. - Les carences magnésiennes en Alsace : diagnostic et correction. II. Coloquio Europeo y mediterraneo, 323-334, 1968.

BRECHBUHLER Ch., DIETRICH J.V., LEVY J.F. - Problèmes de la fertilisation dans le vignoble alsacien. Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation des cultures mediterranéennes, Montpellier, 181-186, 1964.

BRUZAU F., JUSTE C., POUJET R. - Mise en évidence d'une carence en calcium chez la vigne cultivée en solution nutritive. C.R. Acad Sc. Paris, 266, Série D, 116-118, 1968.

CARLES J., ALQUIER-BOUFFARD A., MAGNY J. - De l'influence du pétiole sur la composition du limbe de la feuille de vigne. Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation des cultures méditerranéennes, Montpellier, 171-173, 1964.

CHOUARD P. - Cultures sans sol. La Maison Rustique, 1954.

CHRISTENSEN P. - Seasonal changes and distribution of nutritional elements in thompson seedless grapevines. Presented at the annual meeting of the American Society of Enologists, Coranoda, California, June 22, 1968.

COIC Y. et Mme LESAINT C. - Comment assurer une bonne nutrition en eau et ions minéraux en horticulture. Horticulture Française, mai 1971.

COOK J.A., CARLSON C.V. - California vineyards respond to potash. Better crops with plant food, 55, 1961.

COOK J.A., KISHABA T. - Petiole nitrate analysis as a criterion of nitrogen needs in California vineyards. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 68, 1956.

DANAILOV B., MICHAILOVA S. - Etude de l'influence des éléments N, K et P sur l'initiation florale chez la vigne. I. Symposium sur la physiologie de la vigne, Varna, Bulgarie, 1971.

DEJAEGERE R. - Effets physiologiques de l'absorption d'azote ammoniacal par les plantes supérieures. Ann. de Gembloux, 75, 2, 87-98, 1969.

DELAS J., MOLOT C. - Essais de traitement de la carence en magnésium dans le vignoble bordelais. C.R. Acad. Agric. Fr., 715-724, 1965.

DELMAS J. - Recherches sur la nutrition minérale de la vigne Vitis vinifera Var. Merlot en aquiculture. Thèse, 263 pages, 1971.

DELMAS J., BATS J., MARENAUD C. -Etude de l'importance du phosphore dans l'alimentation du pêcher en milieu contrôlé. Acad. Agric. Fr., 792-795, 1959.

DELMAS J., ROUTCHENKO W., BAUDEL C. - Contrôle de la nutrition des plantes par l'analyse minérale du suc. C.R. Acad. Agricul. de Fr., 796-807, 1959.

DROUINEAU G. - Culture sans sol. Ann. Agron., 32, 1951.

DROUINEAU G. - Influence du mode de nutrition azotée sur les formes de l'azote dans la plante. Ann. Agron., 6, 860, 1953.

ECEVIT F.M. - Etude préliminaire sur la nutrition minérale de la vigne en culture hydroponique dans des conditions entièrement contrôlées. D.E.S., Fac. des Sciences, Dijon, 73 pages, 1972.

ELLIS C., SWANEY M.W. - Soilles growth of plants. 2. edition Reinhold, New-York, 1953.

FREGONI M. - La concimazione della vite. Basi scientifiche, fisiologiche, biochimiche ed ampelo-agronomiche. Universita Catolica, Piacenza/Italie, 240 pages, 1970.

GALET P. - Précis de Viticulture, 490 pages, imprimerie Paul Déhan, Montpellier, 1970.

GALZY R. - Remarques sur la croissance de Vitis rupestris cultivée in vitro sur différents milieux nutritifs. Vitis 8, 191-205, 1969.

GÄRTEL W. - Fumure minérale et qualité des vins. C.R. du 3e potassium colloquium de l'Institut International de la potasse, Lisbonne, 73-82, 1965.

GENTILLINI L., CAPPELLERI G. - La nutrizione della vite nei suoi riflessi esteriori e nella diagnostica fogliare. Atti Accad. Italiana della vite e del vino, Siena, 1959.

GERICKE W.F. - The complete guide to soillers gardening, Prentice Hall, New-York, 1940.

GOUNY P. - Observations sur les relations entre la composition minérale de la plante et le rendement. Analyse des plantes et problèmes des fumures minérales. Colloque organisé par l'I.R.H.O., Paris, 87-103, 1956.

HEWITT E.J. - Sans and water culture methodes used in the study of plant nutrition. University of Bristol Agricultural and Horticultural research station, Long Ashton, Bristol. Common Wealth Agricultural Bureaux , 1966.

HOAGLAND D. - Lectures on the inorganic nutrition of plants. Cronica Botanica Ed. Waltham, Mass., U.S.A., 1-225, 1944.

HOAGLAND D., ARNON D.J. - The water-culture method for growing plants without soil. University of California, Berkeley, circular 347, 1950.

HOMES M.V., ANSIAUX J.R., SCHOOR G.V. - L'aquiculture, imprimerie Laconti S.A., Bruxelles, 152 pages, 1953.

HOMES M.V., VAN SHOOR G.H. - Nutrition minérale des végétaux, Masson, Paris, 162 pages, 1969.

HUGLIN P., JULLIARD B. - Sur l'obtention de semis de vignes très vigoureux à mise à fruits rapide et ses répercussions sur l'amélioration génétique de la vigne. Ann. Amélior. plantes, 14 (3), 229-244, 1964.

COOK J.A., LIDER L.A. - Mineral composition of bloomtime grape petiole in relation to rootstock and scion variety behavior. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 84, 1964.

KNOP W. - Der Kreislauf des stoffes. 1, 522-637, Haessel, Leibzig, 1868.

KOZMA P., POLYAK D. - Analyses des boutures des vignes cultivées sur sable. Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation des cultures méditerranéennes, Montpellier, 206-209, 1964.

LAFON J., COUILLAUD F., GAY-BELLILE F., LEVY J.F. - Rythme de l'absorption minérale de la vigne au cours d'un cycle végétatif. Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation des cultures méditerranéennes, Montpellier, 213-217, 1964.

LAGATU H., MAUME L. - Diagnostic de l'alimentation d'un végétal par l'évolution chimique d'une feuille convenablement choisie. C.R. Acad. Sci., 182, 653, 1926.

LAGATU H., MAUME L. - Recherches sur le diagnostic foliaire. Ecole nat. supérieure Agron., Montpellier, 22, 257-306, 1934.

LARSEN R.P. - Nutritional conditions of Concord Vineyards in Michigan: I. Nutrient-element content of petioles in relation to production ; II. Soil analysis in relation to production ; III. petiole analysis and production in relation to application of potassium fertilisers. Quart. Bull. Mich. Agric. Exp. Stat., 39, 1956.

LEVY J.F. - Identification et étude par l'analyse foliaire de quelques carences alimentaires dans le midi de la France. Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation des cultures méditerranéennes, Montpellier, 220-226, 1964.

LEVY J.F. - L'application du diagnostic foliaire à la détermination des besoins alimentaires des vignes. II. Coloquio Europeo y mediterraneo, Sevilla - Espana, 295-305, 1968.

LEVY J.F. - Les bases physiologiques du diagnostic foliaire de la vigne. II. Coloquio Europeo y mediterraneo, Sevilla - Espana, 243-254, 1968.

LEVY J.F. - Vingt années d'application du diagnostic foliaire à la vigne. Communication présentée à l'Accademia Italiana della Vite e del vino, 16 septembre 1970 à Piacenza (Italie).

LEVY J.F. - Quelques exemples de résultats obtenus grâce au diagnostic foliaire dans la fertilisation des vignes. La France Viticole, 6, 159-164, 1971.

LEVY J.F. - Nouvelle progression dans la vulgarisation du diagnostic foliaire. Vignes et Vins Fr., 207, 19-22, 1972.

LINSER W. - Rapport au III. congrès mondial des fertilisants avec toutes les discussions. Frankfurt am main, 147-168, 1958.

LOUE A. - L'intérêt du diagnostic pétiolaire dans les études sur la nutrition et la fertilisation potassique de la vigne. II. Coloquio Europeo y mediterraneo, Sevilla-Espana, 255-267, 1968.

LUCK D. - Die Wirtschaftlichkeit der hydrokultur im Gemüsebau unter Besonderer berücksichtigung der tomatentreiberei. Landwirtschaftsverlag, Hiltrup, 1956.

MAUME L. - Le contrôle biochimique de l'alimentation de la vigne : diagnostic foliaire. Bulletin tech. d'inform. des ingénieurs des services agric., Paris, 56, 75-78, 1951.

MAUME L., DULAC J. - Nouvelles observations sur la nutrition de la vigne contrôlée par l'analyse chimique de la feuille. C.R. Acad. Agric. Fr., 861-864, 1948.

MEIR-SCHWARS - Hydroculture in Israel. Als Manuskript gedrucke Abhandlung. Chafez-Chajim, 1961.

MERIAUX S., LIBOIS A., T.N'GUYEN VAN LONG, BIOLH., NAUDIN R., COLUL Y. - De l'influence de la fertilisation azotée sur le développement de Botrytis cinera dans le vignoble de la Côte d'Or. Acad. Agric. Fr., 1423-1435, 1972.

OLIVAIN C. - Etude en culture stérile de différents herbicides utilisés au vignoble. D.E.A., Fac. des Sciences, Dijon, 37 pages, 1972.

ÖZBEK N. - Ders notlars (inédit), 1968.

PENNINGSFELD P., KURZMANN P. - Cultures sans sol et sur tourbe. Imprimerie de Montligeon, La Chapelle-Montligeon, Orne, 222 pages, 1969.

PERCEVAUX S. de - Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction du facteur du milieu. Ann. Agron., 14 (5), 655-742, 1963.

Philips éclairage - Information technico-commerciale, 1969.

PINTA M. - Methodes de référence pour la détermination des éléments minéraux dans les végétaux. II Coloquio Europeo y mediterraneo, 103-122, 1968.

Culture en aquiculture - Rapport sur les essais effectués en 1963 et 1964. Station Provinciale de Recherches Scientifiques agricoles et viticoles. Comité de recherches scientifiques en viticulture. La Hulpe. Suisse.

RIBEREAU GAYON J., PEYNAUD E. - Science et technique de la vigne. 1, Dunod, Paris, 730, 1971.

ROUTCHENKO W. - Recherche d'une base d'interprétation de l'analyse des végétaux en vue d'apprécier les conditions de leur nutrition minérale. C.R. Acad. Agric., 182-192, 1965.

SACHS J. - Physiologie végétale. Recherches sur les conditions d'existence des plantes et sur le jeu de leurs organes, Paris, V. Masson, Genêve, 543 pages, 1868.

SAGLIO F. - Nutrition en fer de la vigne. Ann. Physiol. Végét., 11(1), 37-49, 1969.

SAMISH R.M., MOSCICKI W.Z., KESSLER B., HOFFMAN M. - A nutritional survey of Israel vineyards and olive groves by foliar analyses. Nat. and Univ. Inst. of Agr. Special Bulletin, 39, 1961.

SAROSI M. - Etudes effectuées en Hongrie en connexion avec le contrôle de la nutrition de la vigne par l'analyse des feuilles. Le contrôle de la nutrition minérale et de la fertilisation des cultures méditerranéennes, Montpellier, 242-250, 1964.

SHAULIS N., KIMBALL K. - The association of nutrient composition of concord grape petiole with deficiency symptoms, growth and yield. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., 68, 1956.

SIMON J.L., RYSER J.P., JAQUINET A. - La lutte contre la carence magnésienne au vignoble. Revue suisse viticole et arboricole, 2, 6 123-126, 1970.

SMITH C.B., FLEMING K., POORBAUGH J. -The nutritional status of Concord Grape Vines en Erie County, Pennsylvania as indicated by petiole and soil analyses. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci., vol. 70, 1957.

STEINER A.A. - Hyroculturversuche in den Niederlanden. Als Manuskript im Rahmen des internationalen arbeitskreises für hydrocultur gedruckt, 1958.

STEINER A.A. - A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. Plant and soil, XV, 2, 132-154, 1961.

VIDAL J.P., MAGNY R.P., MARCELIN H. - Quelques aspects de l'alimentation de la vigne. Bull. Tech. des P.O., 59, 43-47, 1971.

THESE de DOCTEUR INGENIEUR

présentée par Mr Fevzi Mustafa ECEVIT

Ingénieur Agronome de la Faculté d'Agronomie de

l'Université de ANKARA

SUJET DE LA THESE

Contribution à l'étude de la nutrition minérale de la vigne en culture sur solutions contrôlées.

Vu et permis d'imprimer,

DIJON, le I4 Mai I975

Le Président de l'Université,

P. FEUILLEE